VISIT…

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ

Г.М. Бланк

ВВЕДЕНИЕ В АСТРОНОМИЮ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

для студентов I курса геодезического
и II курса вечернего факультетов

Москва
2008 год

Составитель: Бланк Г.М.

Бланк Г.М. Введение в астрономию: Учебное пособие – М.:Изд-во МИИГАиК, 2008.

© Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), 2008г.

Оригинал-макет данного издания является собственностью издательства и его репродуцирование (воспроизведение) любым способом без согласия запрещается.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ **4**

1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ АСТРОНОМИИ **5**

2. РАЗДЕЛЫ АСТРОНОМИИ **7**

2.1. Астрометрия **7**
2.1.1. Сферическая астрономия 7
2.1.2. Фундаментальная астрометрия 13
2.1.3. Геодезическая астрономия 19

2.2. Небесная механика **20**

2.3. Теоретическая и практическая астрофизика **28**
2.3.1. Виды взаимодействий в природе 28
2.3.2. Мощность излучения. Блеск 29
2.3.3. Спектральный анализ излучения 30
2.3.4. Цвет космического объекта, температура 32
2.3.5. Зависимость спектр-светимость 33
2.3.6. Образование звезд 34
2.3.7. Эволюция звезд 36
2.3.8. Солнце 38
2.3.9. Солнечные и земные явления 41
2.3.10. Солнечная система 44

2.4. Происхождение и эволюция Вселенной **48**

2.5. Галактики. Скопления галактик **51**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ **54**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Астрономия является одной из самых древних наук. Ее развитие влияло и влияет на развитие всего естествознания. В свою очередь, развитие других наук влияет на развитие астрономии. И если несколько тысячелетий назад основными задачами астрономии были ориентирование на местности и счет времени, то сейчас она занимается изучением физических и химических строений небесных тел, движений этих тел, происхождением и развитием отдельных тел и Вселенной в целом. Астрономия разделилась на отдельные дисциплины, решающие эти задачи.

Обычно во многих книгах по астрономии на одной-двух страницах описывается, какие задачи решает каждая дисциплина. Я об этом написал чуть-чуть подробнее – получилось несколько десятков страниц. В этом пособии мы краем глаза заглянули в бесконечные просторы астрономии.

При современной школьной программе, в которой не всегда предусмотрено изучение астрономии, пособие будет полезно студентам для ознакомления с этими вопросами.

Автор выражает благодарность рецензентам: старшему научному сотруднику ГАИШ МГУ Уральской В.С. и доценту кафедры АиКГ МИИГАиК Крылову В.И. , а также, за просмотр рукописи и ценные замечания, заведующему отделом астрометрии ГАИШ МГУ доктору физико-математических наук Куимову К.В. и заведующему кафедрой астрономии и космической геодезии МИИГАиК профессору Краснорылову И.И.

1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ АСТРОНОМИИ

Астрономия – это наука о Вселенной, частью которой являемся и мы. Проявляя громадное терпение изо дня в день, из года в год, из столетия в столетие мы непрерывно наблюдаем окружающий нас мир, накапливаем результаты наблюдений, систематизируем их и выводим различные законы. Мы – человечество.

В астрономии наблюдается излучение небесных тел. Излучения имеют различную яркость (блеск). По этому излучению наблюдатель, находящийся на поверхности Земли, с помощью различных приборов определяет направления на небесные тела (рис. 1). По направлениям получают взаимные положения небесных тел. А так как все в природе движется, то направления изменяются и эти изменения позволяют определить взаимные движения небесных тел. Определение положений и движений небесных тел – одна из главных задач астрономии.

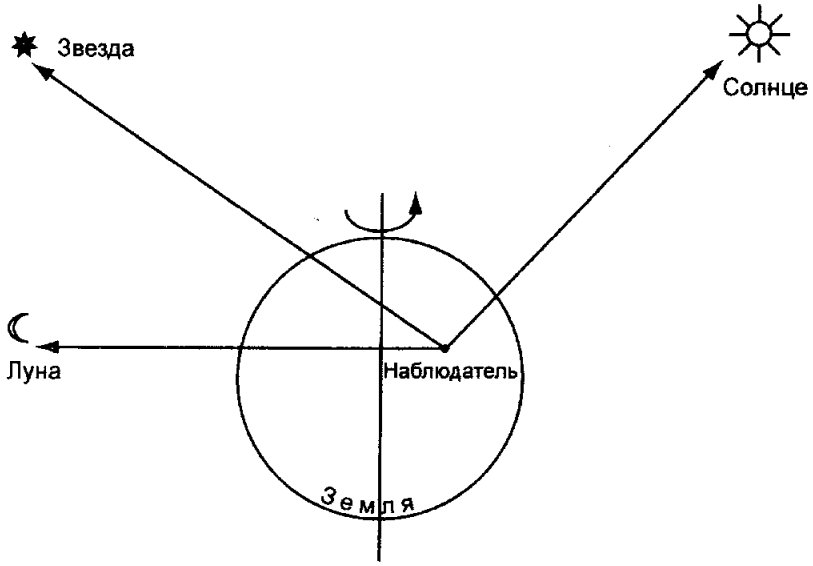


Рис. 1

Излучения небесных тел имеют различные цвета. Изучением спектра излучения занимался Ньютон. В XIX веке был изобретен спектральный анализ.

Любое вещество излучает. Каждый элемент таблицы Менделеева имеет свой спектр излучения. Разлагая излучение тела в спектр и ис-

пользуя лабораторные спектры элементов, можно достаточно точно определить химический состав тела, физические свойства, температуру. Излучение тела может быть во всем спектральном диапазоне: от гамма-излучения (менее 0.1 ангстрема) до радиодиапазона (рис. 2).

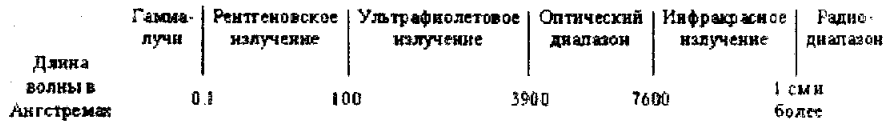


Рис. 2

Этот метод лежит в основе астрофизики, которая изучает строение, физические свойства и химический состав небесных тел. Астрофизика решает вторую главную задачу астрономии.

Вопросы: откуда мы, куда мы движемся в своем развитии, какая взаимосвязь между микропроцессами и макропроцессами вряд ли получат ответы. Но попробовать узнать это можно. Любопытство определило развитие третьего раздела астрономии: космогонии и космологии, которые занимаются изучением происхождения и развития небесных тел и Вселенной в целом.

Развитие всех дисциплин астрономии неразрывно связано друг с другом и с развитием других наук: физикой, химией, биологией, геодезией, математикой и т.д.

2. РАЗДЕЛЫ АСТРОНОМИИ

2.1. Астрометрия

Первая дисциплина, которая в глубокой древности положила начало развитию астрономии – астрометрия, позволяющая человеку ориентироваться на местности и измерять короткие и длительные промежутки времени. Астрометрия условно делится на сферическую астрономию, фундаментальную астрометрию, геодезическую астрономию.

2.1.1. Сферическая астрономия

Во всех областях науки и техники необходима система отсчета, относительно которой выполняются измерения. Желательно иметь систему отсчета, позволяющую использовать строгие математические уравнения. Такой системой может быть сферическая.

В центре сферы находится наблюдатель – точка О (рис. 3).

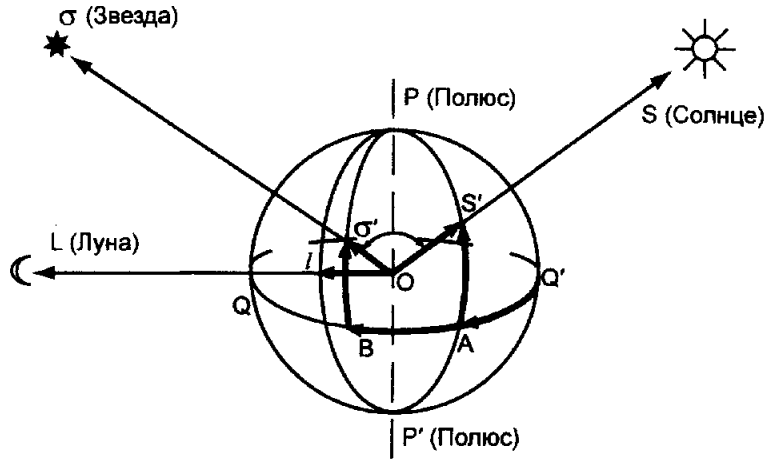


Рис. 3

Все направления, под которыми наблюдатель видит небесные объекты, пересекут сферу. На сфере получатся проекции небесных объектов в виде точек: для Солнца – S′, для Луны – l, для звезды – σ′. Если на сфере провести две взаимно перпендикулярные окружности (QBAQ′Q и PQ′P′QP) и использовать их в качестве системы отсчета с начальной точкой Q′ (пересечение этих двух окружностей), то положение любой точки на сфере (а это проекции небесных тел) можно определить относительно

построенной таким образом системы координат. Сфера – математически правильная поверхность, поэтому положения точек на сфере и изменения этих положений относительно используемой системы координат и относительно друг друга можно определить абсолютно точно. Сферическая астрономия занимается математическими методами определения положений и движений небесных тел с помощью сферических систем координат.

Существует много эффектов, влияющих на изменение направлений на наблюдаемые объекты. При использовании сферических систем координат мы должны это учитывать и вносить поправки в результаты измерений. Сферическая астрономия занимается теорией закономерных изменений координат со временем. Направления и, соответственно, координаты изменяются вследствие астрономической рефракции, астрономической аберрации, геометрического параллакса, прецессии, нутации, собственного движения небесных тел.

Астрономическая рефракция

Луч света от небесного тела в космосе не искажается, распространяясь по прямой линии (σA, рис. 4).

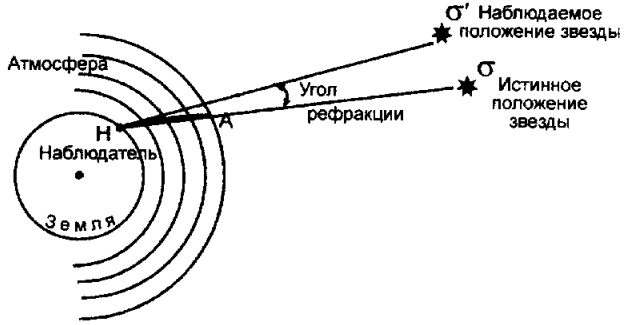


Рис. 4

Дойдя до земной атмосферы, которая, чем ближе к Земле, тем становится плотнее, луч начинает преломляться и опишет кривую AH. Когда свет дойдет до наблюдателя, луч будет направлен по касательной к кривой AH и звезду наблюдатель увидит по направлению Hσ′. Истинное направление на объект будет искажено на угол σ′Hσ. Угол определяется и учитывается при вычислении положения наблюдаемого объекта.

Рефракция зависит от плотности атмосферы, которая, в свою очередь, зависит от температуры и давления.

Астрономическая аберрация

Скорость распространения сигнала любой длины волны от небесного тела около 300 000 км/с. Скорость движения наблюдателя в пространстве, вызванная суточным вращением Земли вокруг своей оси, от 0.464 км/с (наблюдатель на экваторе) до 0 (наблюдатель на полюсе). Скорость движения наблюдателя, вызванная годичным обращением Земли вокруг Солнца, 29.5 км/с (рис. 5).

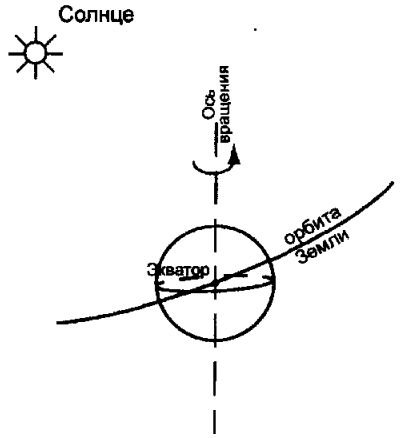


Рис. 5

Такая скорость движения достаточно велика по сравнению со скоростью распространения сигнала и вызывает непрерывное изменение направления на наблюдаемый объект. При использовании сферической системы координат происходит смещение положения на сфере наблюдаемого объекта (точка σ) в сторону направления движения наблюдателя (точка σ′) (рис. 6).

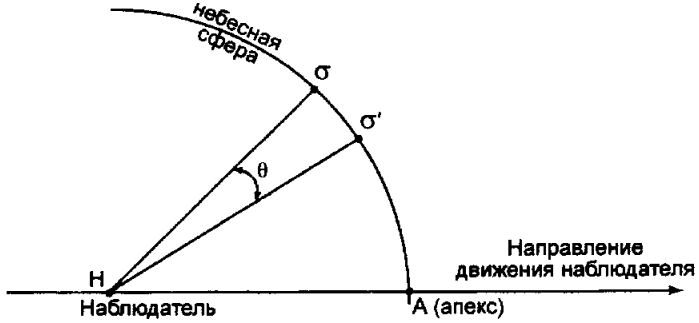


Рис. 6

Угол между истинным направлением на объект Нσ и видимым Нσ′ зависит от скорости движения наблюдателя и пропорционален v / c (v – скорость движения наблюдателя, c – скорость света). Значение этого угла вычисляется и учитывается при обработке измерений.

Параллактическое смещение

Если наблюдатели находятся в разных точках поверхности Земли, то при одновременных наблюдениях одного и того же объекта получаются разные направления. Разные направления получаются и при наблюдении одного и того же объекта с одного пункта, но в разное время (рис. 7). Явление носит название суточного параллакса (углы p_1, p_2, p_1', p_2').

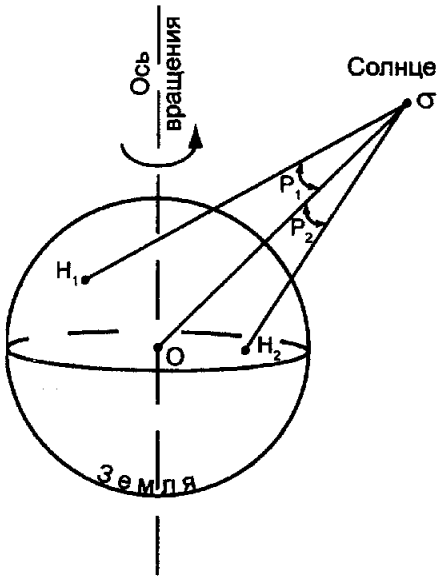


Рис. 7а

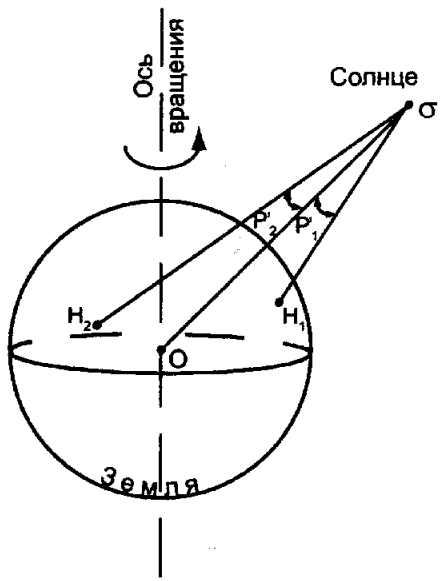


Рис. 7б (Прошло 9 часов)

При решении различных задач все измеренные направления редуцируют на одно и то же направление, началом которого является центр Земли. Суточный параллакс для этого направления равен нулю. Практически, суточный параллакс надо учитывать при наблюдении близких небесных тел. Для удаленных объектов суточный параллакс пренебрежимо мал.

Подобная картина получается и при наблюдениях в разное время в течение года, когда наблюдатель находится в разных точках земной орбиты (рис. 8).

Рис. 8

Явление носит название годичного параллакса. Для его учета центром сферической системы координат выбирают Солнце (точнее, центр масс солнечной системы). Направления, полученные из наблюдений, проектируются на Sσ.

Замечание. Рефракционные, аберрационные, параллактические углы малы (от долей до десятков секунд дуги). На чертежах они увеличены для наглядности.

Прецессия. Нутация

При решении различных задач часто используется сферическая экваториальная система координат. Основной круг – проекция земного экватора на сферу. Начальный (перпендикулярный основному) - круг, проходящий через точки весеннего (γ) и осеннего () равноденствий. Этот круг называется колюром равноденствий. Точки γ и получаются от пересечения эклиптики (плоскость годичного обращения Земли вокруг Солнца) и экватора (рис. 9).

Положения осей и плоскостей систем координат в пространстве определяются относительно наиболее удаленных объектов, которые нам кажутся неподвижными (например, звезды). Звезды проецируются на

сферу и их положение определяется в экваториальной системе координат (рис. 9). Изменения координат звезд с течением времени показывают изменение положений оси, экватора, точки весеннего равноденствия (элементы системы координат). Эти изменения вызваны изменением положения Земли в пространстве, ее ориентировки.

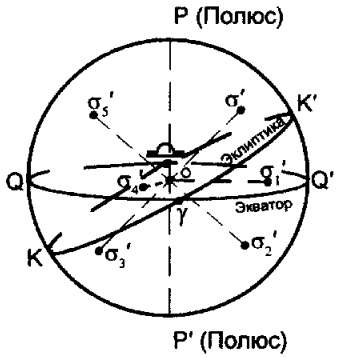


Рис. 9

Земля представляет из себя сплюснутое тело с неравномерно распределенной массой. Между Солнцем, Землей, Луной и другими телами существуют силы гравитационного взаимодействия, которые непрерывно изменяются вследствие непрерывного изменения расстояний между этими телами.

Силы притяжения, вызванные избытком масс в плоскости экватора, создают вращающий момент, изменяющий положение Земли и, соответственно, оси и экватора в пространстве (рис. 10).

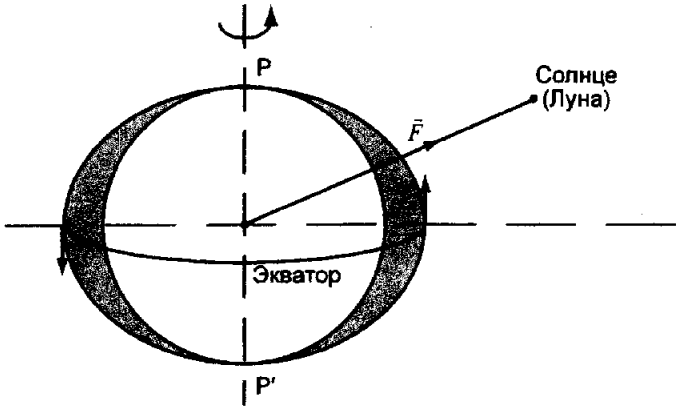


Рис. 10

В свою очередь, это приводит к движению точки весеннего равноденствия. Это изменение носит долгопериодический характер (26 000 лет) и называется прецессией (плавное изменение положения полюса PP') и периодическое (от 18.7 лет до нескольких часов) и называется нутацией – колебание полюса.

Время

Установленные закономерности изменения координат вызваны движением наблюдателя и наблюдаемых объектов, то есть, изменения происходят с течением времени. Величину этих изменений можно получить, используя равномерную шкалу времени. Равномерность шкалы определяется стабильностью периодического процесса, принятого в качестве эталонной единицы в данной шкале времени. В принципе, нам безразлично, какой периодический процесс лежит в основе единицы. Основное требование – стабильность и воспроизводимость процесса. Начало счета не имеет существенного значения.

Долгое время в качестве единицы брали период полного обращения Земли вокруг своей оси – звездные сутки. Если к этому периоду добавить интервал, за который Земля проходит за сутки часть своей орбиты годичного обращения вокруг Солнца, то получаем солнечные сутки (рис. 5). И солнечные, и звездные сутки до сих пор необходимы в астрономии и геодезии, так как они определяют скорость вращения Земли и угол поворота Земли в каждый момент времени.

Звездные и солнечные сутки из-за неравномерности вращения Земли оказались неравномерными и за эталон уже несколько десятилетий берется атомная секунда, определяемая периодом электромагнитных колебаний цезиевого атомного стандарта времени и частоты.

2.1.2. Фундаментальная астрометрия

Строгие математические модели (сфера, сферическая система координат, прямоугольная система координат) позволяют решать все задачи аналитически с помощью точных уравнений. Но так как наблюдения выполняются на реальной Земле, имеющую неправильную форму, сложную структуру, неравномерное распределение масс (рис.11), мы теоретически правильные расчеты должны согласовывать с конкретными измерениями.

Непрерывные наблюдения небесных объектов позволяют получать отклонения от принятых моделей Земли в виде разностей теоретически полученных результатов и результатов, полученных из измерений. Вели-

чина разностей зависит от правильности выбранной модели и точности наблюдений. Взаимосвязь между моделью и реальной Землей приводит к непрерывному повышению точности измерений и уточнению модели. Эти задачи решает фундаментальная астрометрия.

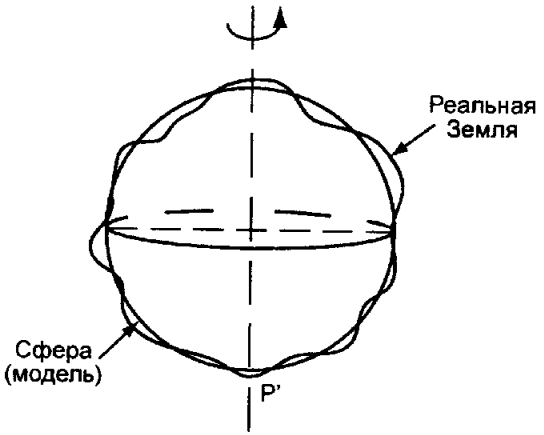


Рис. 11

По наблюдениям звезд и квазаров фундаментальная астрометрия устанавливает небесную систему координат (НСК), а совместно с геодезией – земную систему координат (ЗСК). Каталоги координат звезд и квазаров реализуют небесную систему координат, а каталоги координат пунктов на земной поверхности – земную. Параметры вращения Земли (координаты полюса и солнечное время) связывают небесную и земную системы координат.

Фундаментальная астрометрия определяет астрономические постоянные, дающие численные значения закономерных изменений координат звезд и квазаров и характеризующие Землю, как космическое тело. В этом же разделе астрономии изучаются неравномерности вращения Земли и устанавливаются шкалы времени.

Небесная и земная системы координат

Началом небесной и земной систем координат (рис.12) может являться центр масс Земли (точка О). Положения осей XYZ небесной системы координат (инерциальной системы) определены относительно неподвижных квазаров и не меняют своих направлений в пространстве даже тогда, когда точка О перемещается.

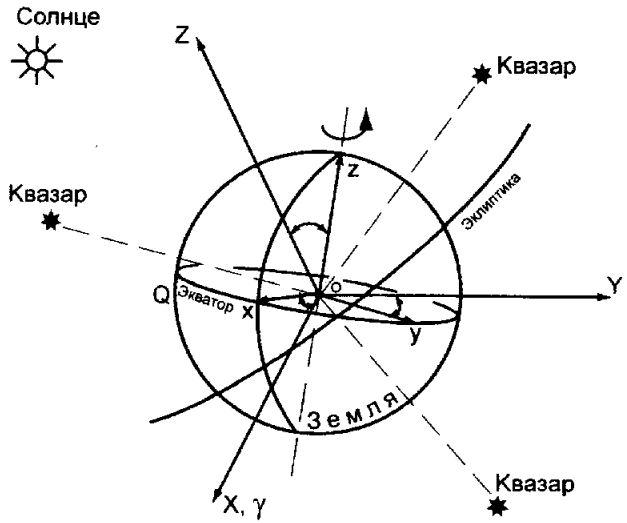


Рис. 12

Квазары наблюдаются на пунктах земной поверхности. Положения этих пунктов определены в земной системе координат xyz, связанной с движущейся и вращающейся Землей.

Положение земной системы координат относительно небесной определяется углами между осями Xx, Yy, Zz. Регулярные наблюдения квазаров позволяют контролировать ориентировку осей ЗСК. Изменения углов между осями ЗСК и НСК вызваны влиянием внешних и внутренних сил на движение и вращение Земли.

Земная система координат помогает изучать процессы, происходящие на поверхности и внутри Земли. Например, движение воздушных масс, приливы, движение материков, землетрясения.

Оси земной системы координат имеют вращения. Углы вращения определяются относительно осей небесной системы координат, а затем учитываются при обработке измерений.

Шкалы времени. Неравномерность вращения Земли

Для установления моментов происхождения событий, определения интервалов между событиями, определения изменения координат необходима равномерная шкала времени. В основе любой шкалы времени лежит постоянно воспроизводимый периодический процесс. Чем точнее его воспроизводимость, тем точнее и равномернее шкала времени.

Постоянно наблюдаемыми периодическими процессами являются вращение Земли вокруг своей оси (звездное время) и годичное обращение Земли вокруг Солнца (солнечное время).

Если направить телескоп на бесконечно удаленную неподвижную точку на небе (звезду) (рис. 13), то после полного оборота Земли вокруг своей оси с одинаковой скоростью вращения наблюдатель увидит ту же самую точку в том же самом месте (например, точка будет пересекать плоскость географического меридиана наблюдателя). Полный оборот Земли вокруг оси определяет величину звездных суток в 24 часа, которые затем делятся на часы, минуты, секунды с помощью механических или электронных устройств.

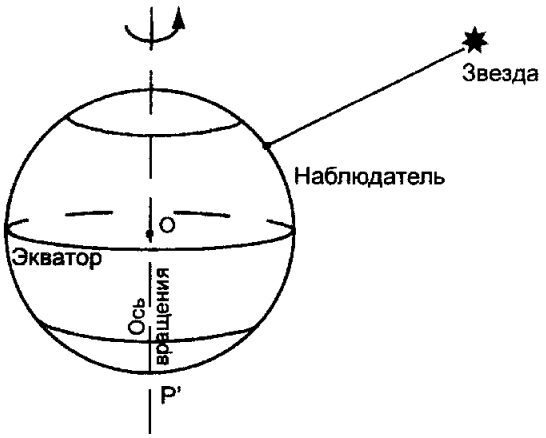


Рис. 13

Если в качестве точки на небе выбрать Солнце, то период, через который наблюдатель увидит Солнце в том же месте (на своем меридиане), определит 24 часа солнечных суток (рис.14).

Из-за движения Земли по орбите после полного оборота Земли вокруг своей оси Земля должна повернуться на дополнительный угол, чтобы наблюдатель оказался напротив Солнца (рис.14). Этот дополнительный доворот Земли показывает, насколько солнечные сутки длиннее звездных. Принципы определения звездного и солнечного времени по наблюдениям звезд, Солнца, Луны, планет и их спутников используются на протяжении многих тысячелетий.

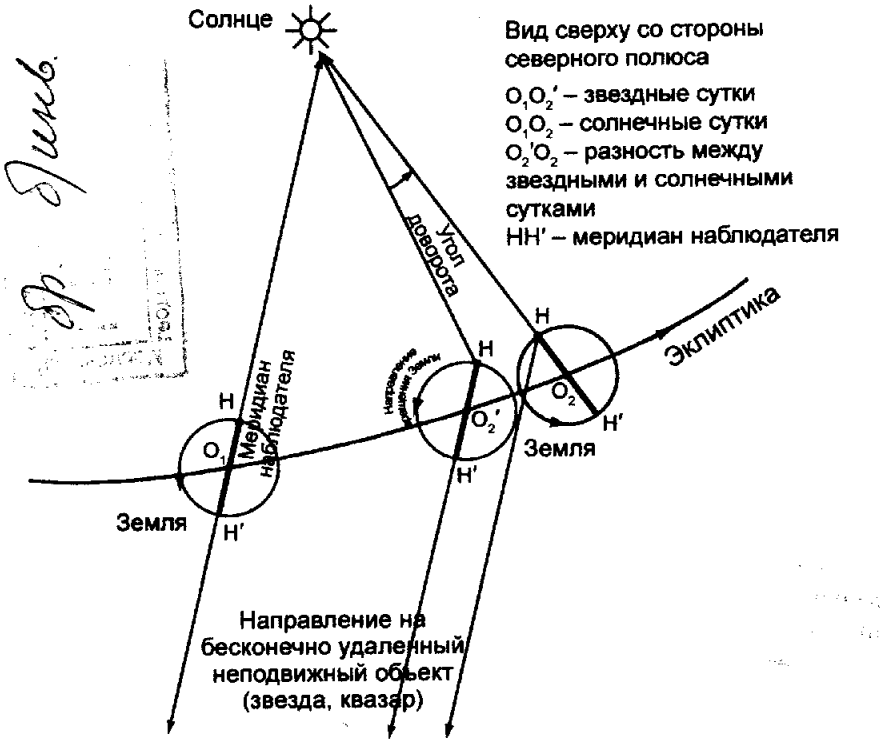


Рис. 14

Шкалы звездного и солнечного времени выводятся из одних и тех же наблюдений, поэтому точность их определения одинакова. Различие существует только в длительности секунд, равные 1/86400 части суток (рис 15).

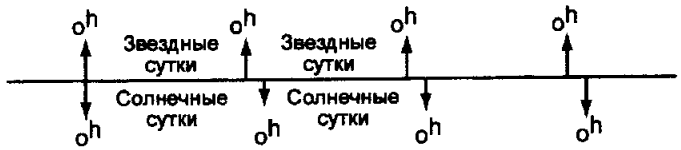


Рис. 15

Совершенствование методов наблюдений, теорий и моделей позволило выявить неравномерности вращения Земли. Изменение скорости вращения Земли вызывается непрерывным ее торможением из-за притяжения Луны и возникающих вследствие притяжения приливов в виде

горбов воды (до 16 метров) и земли (до 50 см), направленных в сторону Луны (рис. 16).

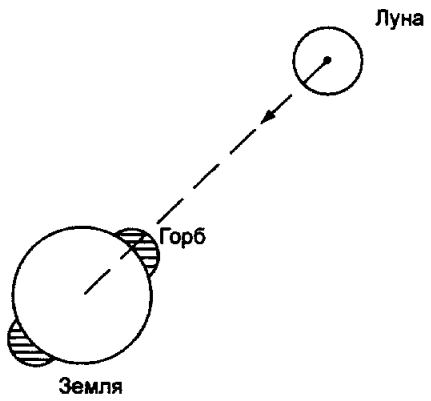


Рис. 16

Сезонное изменение скорости вращения Земли происходит из-за перемещений масс в теле Земли и на ее поверхности, в первую очередь, воздушных масс. Изменение скорости вращения Земли приводит к изменению длительности суток (периодов), определяющих стабильность шкалы времени.

В середине 50-х годов XX века были сконструированы атомные часы, позволившие установить шкалу атомного времени. Она на несколько порядков стабильнее звездного и солнечного времени.

В атомных часах используется частота электромагнитных колебаний кванта энергии, поглощаемого или излучаемого атомом, при переходе с одного энергетического уровня на другой (рис. 17).

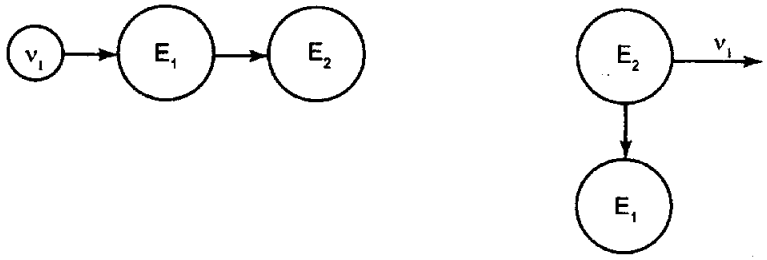


Рис. 17

На рисунке 17а атом поглотил квант энергии строго определенной частоты ν_1 и переходит на более высокий уровень энергии E_2.

На рисунке 17б атом излучил квант энергии строго определенной частоты ν_1 и перешел на более низкий энергетический уровень E_1.

Эта строго определенная частота лежит в основе воспроизводства атомной секунды. Технические трудности состоят в умении отслеживать энергетические переходы. Современные атомные часы создают шкалу атомного времени с точностью $10^{-13} \div 10^{-15}$ на интервале от долей секунды до десятилетий. Для сравнения: звездное или солнечное время имеет точность $10^{-8} \div 10^{-9}$.

2.1.3. Геодезическая астрономия

Геодезическая астрономия занимается определением географических координат пунктов земной поверхности и азимутов направлений на земные предметы астрономическими методами. Для этого используются НСК и ЗСК с началом в центре масс Земли (рис. 18). На пунктах, расположенных на поверхности Земли, выполняются геодезические измерения относительно ЗСК и мы получаем географическую сетку координат. Измерив расстояния между пунктами и углы между направлениями на пункты, получим сетку, произвольным образом расположенную на поверхности Земли. Получив направления меридианов, проходящих через пункты(то есть, привязав их к ЗСК путем определений азимутов направлений с одного пункта на другой), мы жестко закрепим эту сеть на поверхности Земли.

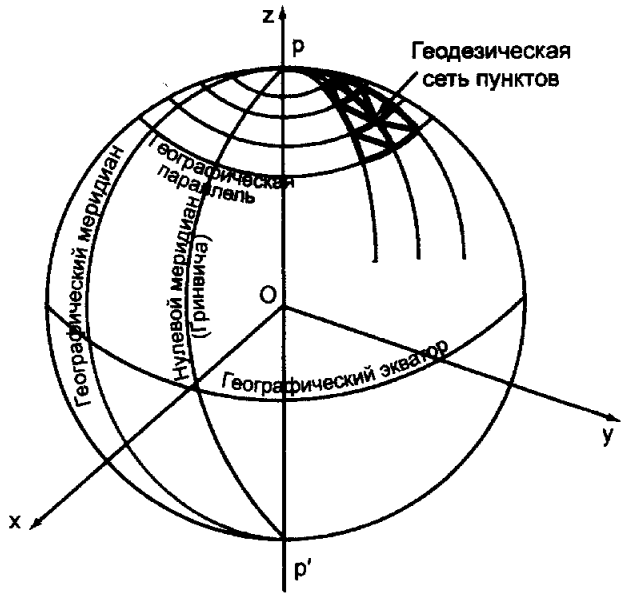


Рис. 18

Глобальная сеть пунктов, привязанная к центру масс Земли и осям ЗСК x,y,z, позволяет определить форму и размеры Земли (выяснилось, что наша Земля близка к эллипсоиду вращения и полярный радиус – r оси z – меньше на 21 км экваториальных радиусов), распределение масс в теле Земли и решать множество других научных и технических задач.

Изменение координат пунктов определяется по астрономическим измерениям на тех же точках земной поверхности. Если наблюдать звезды или квазары на пунктах, положения которых уже определены относительно ЗСК, то получится автоматическая привязка к НСК, так как ЗСК и НСК имеют одно начало и связаны параметрами вращения Земли (ПВЗ). НСК является опорной. Поэтому изменения координат земных пунктов относительно НСК показывают локальные геодинамические изменения, в частности, движения земной коры.

2.2. Небесная механика

Одной из основных задач небесной механики – вычисление элементов орбит небесных тел по их наблюдаемым положениям (эфемеридам) или вычисление эфемерид небесных тел по элементам их орбит.

Эти задачи всегда актуальны – и сейчас и две тысячи лет назад. Две тысячи лет назад это было необходимо, в первую очередь, для навигации.

Для подобных вычислений требовалось знание закономерности движений небесных тел. Движения Солнца, Луны и ближайших планет (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн) наблюдались относительно неподвижных звезд. Опираясь на многовековые наблюдения и идеи Аристотеля, во II веке н.э. Птолемей построил систему мира, позволяющую описывать движения этих тел и вычислять их положения на будущие различные моменты времени.

Система мира Птолемея

В центре мира Птолемей поместил неподвижную Землю. Вокруг Земли по круговым орбитам (деферентам) с равномерной скоростью обращаются Луна и Солнце (рис. 19).

У всех планет также существуют деференты, но сами планеты обращаются с равномерной скоростью по окружностям, которые называются эпициклами. Центры эпициклов обращаются по деферентам вокруг Земли. Птолемей рассчитал радиусы деферентов и эпициклов, скорости движений по деферентам и эпициклам, периоды обращений и еще некоторые необходимые величины, дающие начальные условия.

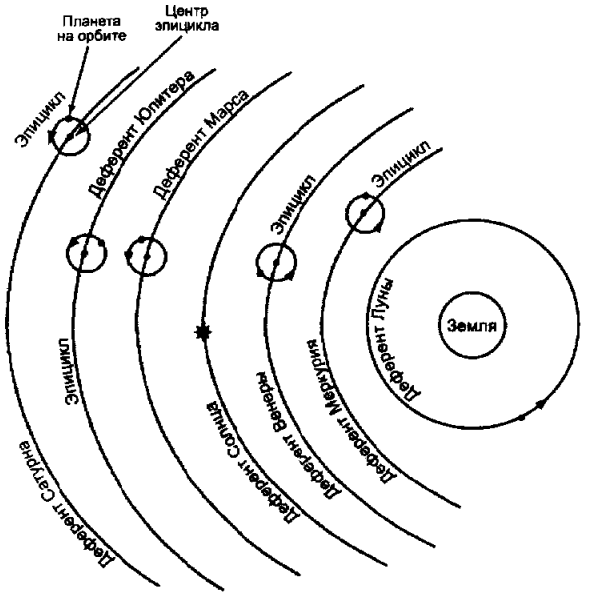


Рис. 19

Эта геоцентрическая геометрия мира позволяла вычислять положения (эфемериды) планет, Солнца и Луны на будущие моменты времени, составлять таблицы положений и использовать их при навигации.

Система исправно служила на протяжении 13 веков! Возникающие трудности – несовпадение теоретически вычисленных положений и положений, полученных из наблюдений – преодолевались добавлением эпициклов (рис. 20), изменением радиусов эпициклов, смещением центров деферентов.

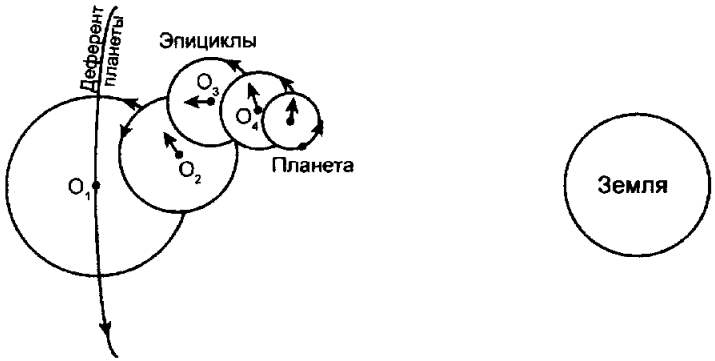


Рис. 20

К XVI веку накопилось большое количество более точных наблюдений. Система Птолемея перестала отвечать предъявляемым требованиям. В 1543 году Коперник предложил новую систему мира.

Система мира Коперника

Система мира Коперника – гелиоцентрическая. В центре Вселенной находится Солнце, вокруг которого по круговым орбитам с равномерной скоростью обращаются планеты (рис. 21).

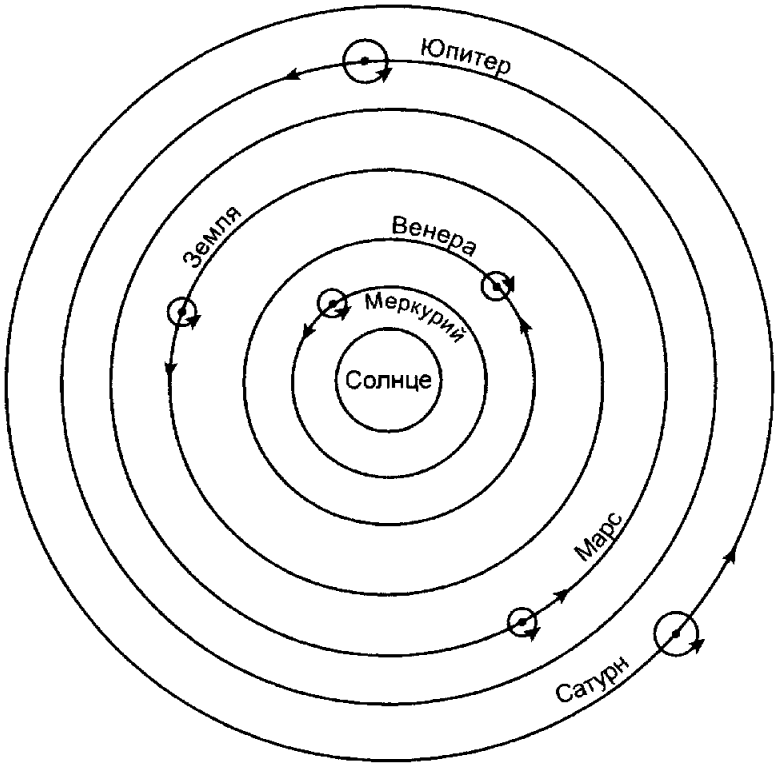


Рис. 21

Кроме этого, планеты вращаются вокруг своей оси. Коперник рассчитал полные периоды обращений планет вокруг Солнца и относительные расстояния планет до Солнца, верно определив строение и масштабы солнечной системы.

Смену дня и ночи Коперник объяснил вращением Земли вокруг своей оси. Видимое движение Солнца среди звезд Коперник объяснил движением Земли вокруг Солнца.

Прямые и попятные движения планет, по Копернику, вызваны движением Земли и самих планет вокруг Солнца. Для полного объяснения сложных движений планет Коперник использовал эпициклы.

Система мира Коперника, с некоторыми поправками, оказалась правильной, но была принята не сразу и привела к трагическому концу многих великих ученых, поддержавших его учение (сожжение на костре Джордано Бруно, домашний арест Галилея).

Правильную картину мира и законы движения планет вокруг Солнца сформулировал Кеплер после 20-летних наблюдений Марса величайшим астрономом-наблюдателем человечества Тихо Браге. В этих работах в течение 7 лет принимал участие и Кеплер.

Кеплер, не сумев подобрать круговую орбиту для описания движения Марса, пришел к выводу, что орбитой Марса является эллипс.

Законы Кеплера используются для описания невозмущенных движений тел солнечной системы.

Законы Кеплера

1. Первый закон Кеплера. Все планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Солнце находится в одном из фокусов эллипса (рис. 22). Точка П называется перигелием – это ближайшее расстояние от Солнца. А (афелий) – наиболее удаленное расстояние от Солнца. АП – линия апсид, большая ось эллипса. MN – малая ось. Сжатие эллипса (сплюснутость) определяется отношением f f /АП.

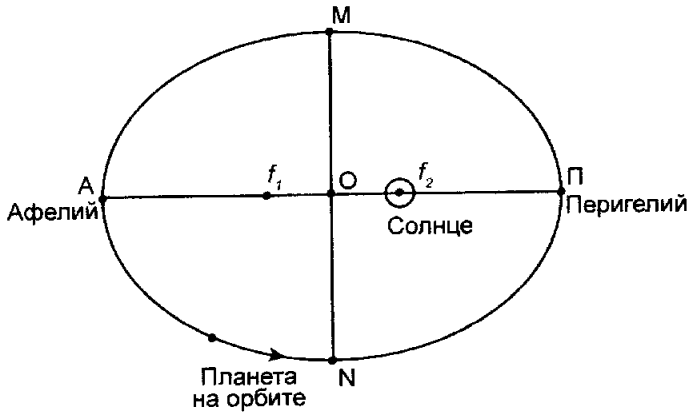


Рис. 22

2. Второй закон Кеплера. За равные промежутки времени радиус-вектор, соединяющий Солнце с планетой, находящейся на орбите, описывает равные площади (рис. 23).

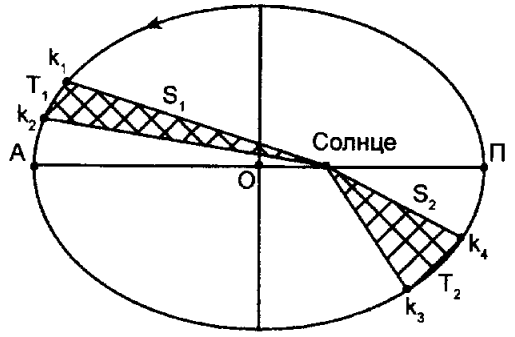


Рис. 23

Если время прохождения дуги k_1k_2, равное T_1, равно времени прохождения дуги k_3k_4 T_2 (T_1=T_2), то и площади, описываемые радиусом-вектором, S_1 и S_2 равны (S_1=S_2).

Поскольку орбита представляет собой эллипс, то следствием второго закона Кеплера будет неравномерное движение планеты по орбите.

3. Третий закон Кеплера. Квадраты периодов обращений двух планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит (рис. 24).

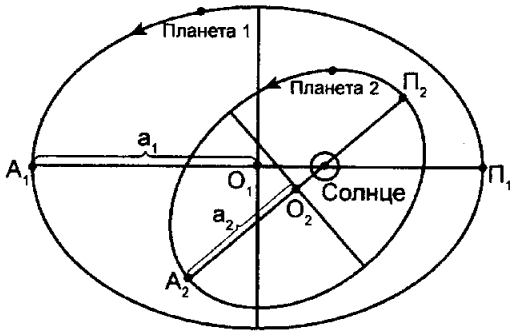


Рис. 24

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

Законы Кеплера описывают видимое движение тел солнечной системы и позволяют решать задачи теоретической астрономии. Положения планет и их орбиты вычисляются относительно плоскости орбиты Земли – эклиптики.

Положение эклиптики в пространстве определено относительно квазаров или звезд через НСК. Поэтому параметры орбиты планеты, ее положение относительно эклиптики определят положение планеты относительно НСК.

Для планет и других небесных тел, обращающихся вокруг Солнца, чаще всего опорной плоскостью является плоскость эклиптики, относительно которой определяется положение тела. Для искусственных спутников Земли (ИСЗ) опорной плоскостью является плоскость экватора. Элементами орбит являются следующие шесть элементов (рис. 25).

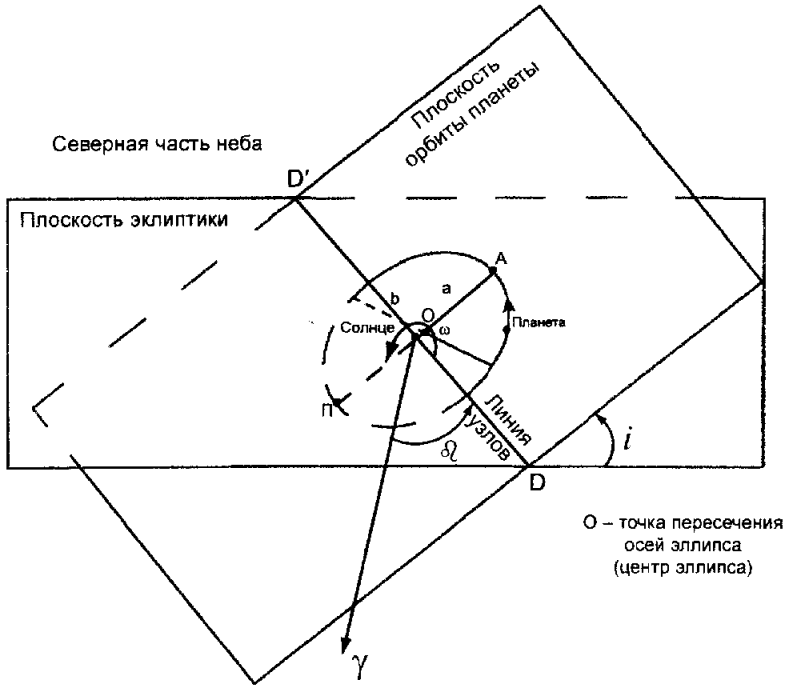


Рис. 25

1. Угол i – наклон плоскости орбиты к плоскости эклиптики (для ИСЗ – к плоскости экватора. Отсчитывается от плоскости эклиптики и принимает значения от 0° до 180°. Если i<90°, то движение небесного тела направлено в ту же сторону, что и движение Земли (наблюдателя на по-

верхности Земли), если i>90°, то движения будут навстречу друг другу.

2. Угол Ω – долгота восходящего узла. Угол Ω находится в плоскости эклиптики. DD′ – линия узлов. Точку D называют восходящим узлом орбиты – небесное тело пересекает эту точку при своем движении, переходя из южной части неба в северную. Точка D′ – нисходящий узел – тело переходит из северной части неба в южное. Линия узлов – линия пересечения плоскости эклиптики с плоскостью орбиты планеты.

Углы i и Ω определяют положение плоскости орбиты небесного тела в пространстве относительно принятой небесной системы координат (относительно эклиптики, относительно звезд или квазаров).

3. Угол ω – угол, отсчитываемый от направления на восходящий узел орбиты небесного тела до направления на перигелий его орбиты. Угол ω находится в плоскости орбиты тела. Угол может принимать значения от 0° до 360° и определяет положение орбиты небесного тела (положение эллипса) в плоскости орбиты.

4. Размеры орбиты определяются ее большой полуосью a.

5. Форма орбиты (эллипса) определяется эксцентриситетом эллипса $e = \frac{a-b}{a}$, где a – большая полуось орбиты, b – малая.

6. Для определения положения небесного тела на орбите используется или начальный момент t_0, когда тело находится в перигелии или угол M_0 – угловое расстояние от перигелия (называется средней аномалией в эпоху), когда тело находится в любой точке орбиты.

Небесная механика занимается изучением действительных движений небесных тел на основе закона Всемирного тяготения, изучает форму, размеры и массу небесных тел и определяет устойчивость их систем.

Небесная механика усиленно начала развиваться после того, как Ньютон математически обосновал законы Кеплера и на основе этих законов и своих доказательств вывел закон Всемирного тяготения: два тела действуют друг на друга с силой прямо пропорциональной произведению масс этих тел и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

$$F = f\frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad f - \text{постоянная тяготения}$$

С открытия закона всемирного тяготения начинается новая эра развития астрономии. Усилиями Клеро, Даламбера, Эйлера, Лагранжа, Лапласа разрабатываются математические методы описания возмущенных движений небесных тел. Выяснилось, что обращение тел вокруг Солнца происходит не по строго эллиптическим орбитам. Но точно учитывать возмущения аналитическими методами оказалось невозможно. Для учета

возмущений используются способы последовательных приближений.

Тела солнечной системы могут двигаться не только по эллиптическим орбитам, но и по параболам и гиперболам.

Возмущения имеют очень сложный характер и были обнаружены при повышении точности наблюдений, когда стали использоваться оптические телескопы.

Движение тел солнечной системы изучается по их положениям и скоростям. Движения тел чрезвычайно разнообразны, условия непрерывно меняются.

Методы небесной механики позволили обнаруживать (открывать) различные небесные тела. Так была открыта в 1846 году планета Нептун. Наблюденные положения Урана расходились с вычисленными и было сделано предположение, что движение Урана возмущается неизвестной планетой. Были вычислены положения этой планеты в разные моменты. Наблюдатели именно там ее и обнаружили.

Наблюдаемые движения небесных тел и учет взаимных возмущений позволяет изучать динамику солнечной системы, ее устойчивость. Такими телами, кроме планет и их спутников, являются малые планеты (астероиды), количество которых около 300 000, кометы, метеоры.

Особое место в небесной механике занимает изучение движений искусственных спутников Земли (ИСЗ), начало которому положил запуск в СССР первого ИСЗ в 1957 году.

Спутники различаются по высоте орбиты, наклону плоскости орбиты к экватору, эллиптичности орбиты, периоду обращения спутника вокруг Земли (рис. 26).

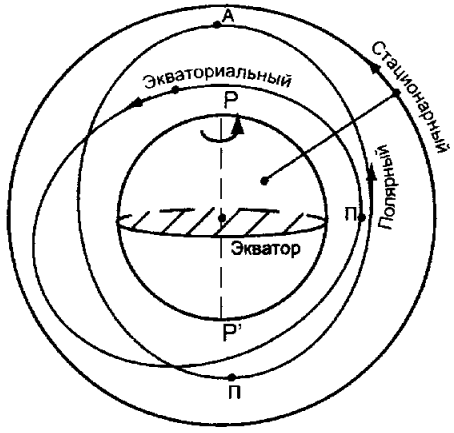


Рис. 26

Перечисленные параметры спутников определяются назначением спутников. Спутники помогают решать геофизические, геодезические, метеорологические, навигационные и другие задачи.

Возмущения движения спутников вызываются атмосферой, сжатием Земли и ее неоднородностью, солнечной радиацией. На спутники с высокой орбитой влияют лунно- солнечные возмущения.

2.3. Теоретическая и практическая астрофизика

Астрофизика изучает строение, физические свойства и химический состав небесных тел. Основой для подобных изучений служит спектральный анализ электромагнитного излучения тела и мощность (яркость) этого излучения. Множество разделов астрофизики определяются названием изучаемых объектов (физика Солнца, физика планет, физика звезд и т.д.), диапазоном волн излучения (рентгеновская астрономия, радиоастрономия и т.д.), методами наблюдений (фотометрия, астрофотография, колориметрия и т.д.). Предполагается, что почти все процессы, происходящие во Вселенной, подчиняются основным законам физики и химии, открытыми на Земле. В первую очередь, это касается взаимодействий в природе.

2.3.1. Виды взаимодействий в природе

Существуют четыре вида взаимодействий в нашем мире: электромагнитное, гравитационное, сильное и слабое.

Электромагнитные силы, которые проявляются в атомных процессах и в движении межзвездного газа в магнитном поле, убывают с увеличением расстояний и уменьшением величины заряда. Действия этих сил описываются уравнениями Максвелла..

Гравитационные взаимодействия, описываемые законом всемирного тяготения Ньютона, как и электромагнитные, уменьшаются пропорционально квадрату расстояния и являются самыми слабыми в природе. Тем не менее, они определяют структуру и устойчивость систем небесных тел, движение небесных тел, форму и размеры небесных тел, внутреннее строение небесных тел.

Движение небесных тел в сильных гравитационных полях и со скоростями, близкими к скорости света, более точно описывает общая теория относительности.

Два вида взаимодействий – сильное и слабое – относятся к внутриатомным и позволяют объяснить процессы синтеза и распада.

Сильное взаимодействие - самое сильное в природе, но очень быстро уменьшается с увеличением расстояния. Оно обеспечивает ядерные реакции синтеза.

Слабое взаимодействие (как и сильное) получено из теоретических расчетов. Оно участвует в β-распаде. Слабое взаимодействие быстро уменьшается с расстоянием.

2.3.2. Мощность излучения, блеск

Световой поток, приходящий к наблюдателю от наблюдаемого тела, определяется мощностью излучения самого тела и расстоянием небесного тела от наблюдателя. Световые потоки измеряются фотоэлектрическими приемниками излучения и калибруются относительно принятых стандартных физических эталонов.

Видимый наблюдаемый блеск объекта зависит от расстояния наблюдателя до объекта. Например, Солнце для нас – самое яркое из всех излучающих объектов. Но если Солнце расположить рядом с другой звездой (допустим, Сириус), то его излучение будет во много раз слабее Сириуса (рис. 27).

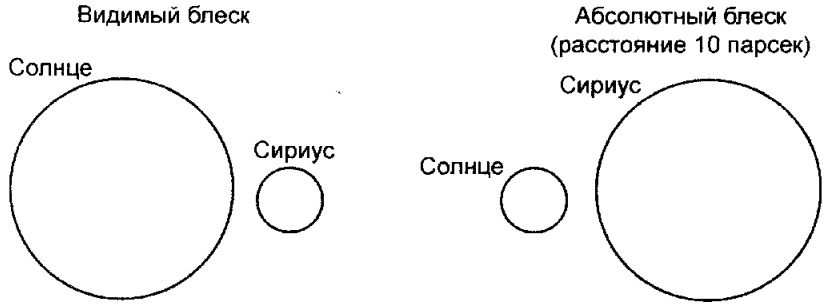


Рис. 27

Различают видимый блеск объектов (поток излучения, получаемый из прямых наблюдений) и абсолютный (поток излучения, который приходит к наблюдателю от объекта, расположенного на расстоянии 10 парсек от наблюдателя). Эти две величины связаны друг с другом и расстоянием до объекта, что позволяет получать расстояния, если известны видимое и абсолютное значения блеска.

2.3.3. Спектральный анализ излучения

Спектральный анализ излучения небесных объектов и сравнение спектров с лабораторными земными эталонами дает нам характеристику физического состояния, химического состава и температуры небесных тел.

При исследовании спектров небесных объектов пользуются моделью, называемую абсолютно черным телом. Тело находится в состоянии термодинамического равновесия. Состояние черного тела (излучение или поглощение) зависит только от температуры тела и определяется функцией Планка. Согласно закону смещения Вина, максимум излучения абсолютно черного тела смещается в коротковолновую часть спектра при увеличении температуры тела (рис. 28).

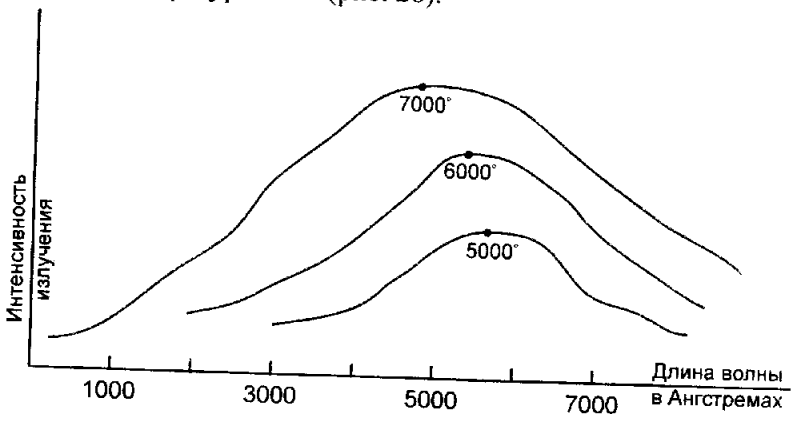


Рис. 28

Сравнивая излучение небесных объектов с лабораторными спектрами элементов, определяют плотность объекта, ионизацию вещества, количество отдельных химических элементов, поляризацию излучения.

У разреженных газов линейчатые спектры, излучение сосредоточено в узких участках – ярких спектральных линиях. Возникновение линейчатых спектров связано с непрерывно меняющейся внутренней энергией атомов, то поглощающих, то излучающих энергию.

Яркость линий спектра излучения пропорциональна количеству вещества, если излучающий слой газа прозрачен. Чем непрозрачнее газ, тем ближе его излучение в соответствующей длине волны к излучению абсолютно черного тела. Для толстого слоя газов и, тем более, для жидких и твердых тел излучение напоминает равновесное излучение абсолютно

черного тела. Спектр становится непрерывным, все линии сливаются. В непрерывном спектре наблюдаются светлые линии (излучение) и темные линии (поглощение).

Атомы могут поглощать или излучать кванты энергии, присоединять или отдавать электроны. При отрыве электрона от атома происходит ионизация атома. Если электрон захватывается ионом (рекомбинация), то выделяется квант энергии. В результате рекомбинации возникает излучение с непрерывным спектром, имеющим резкую границу с красного конца.

Непрерывные спектры дают представление о температуре, плотности и количестве излучающего газа. Отождествление спектральных линий со спектрами известных химических элементов позволяет установить их присутствие в космических телах. Исследование отдельных спектральных линий дает сведения о температуре, давлении, количестве излучающих или поглощающих атомов, внутренних движениях в газе, величине магнитного поля.

Расположение спектральных линий атома определяется зарядом его ядра и количеством внешних электронов. Спектры элементов и ионов с одинаковым количеством внешних электронов сходны между собой.

У атомов бывает несколько энергетических уровней. Самый глубокий – основной, нейтральный. При переходе на первый уровень наблюдаются яркие линии спектра –они называются резонансными.

У многих космических объектов электромагнитное излучение поляризовано – имеет наибольшую интенсивность в какой-то определенной плоскости.

Если в спектре наблюдаются близкие по своей структуре и расположению линии, то они могут являться компонентами одного и того же излучения , находящегося в магнитном поле. Расстояния между компонентами зависят от напряженности магнитного поля. Наблюдения подобных спектральных эффектов позволяет изучать космические магнитные поля.

Громадную роль в изучении движения космических объектов играет эффект Доплера. Он заключается в том, что при движении космических объектов к наблюдателю происходит смещение спектра к фиолетовому концу, при движении объекта от наблюдателя – к красному. По эффекту Доплера можно изучать движение небесных тел в пространстве и их вращение. Например, для Солнца эффект Доплера показывает, что оно делает полный оборот вокруг своей оси за 25-30 дней. По доплеровскому смещению спектральных линий определяется скорость и направление вращения небесного тела. У звезд линейные скорости вращения вызывают расширение спектральных линий.

Спектральные линии излучающего газа имеют доплеровские смещения из-за хаотичных тепловых движений. Происходит симметричное расширение спектральной линии (профиль). Если расширение вызвано только тепловыми движениями, то по профилю можно судить о температуре светящегося газа.

Линии спектра показывают наличие химического элемента в исследуемом теле. Для тонкого слоя излучения газа яркость спектральных линий пропорциональна количеству излучающих атомов. По измеренной излучаемой или поглощаемой энергии вычисляется количество атомов, масса в данной линии. Если эта масса составляет главную долю, то можно найти плотность. Так определяется концентрация вещества в прозрачных газовых туманностях. У непрозрачных объектов плотность, давление влияют на форму отдельной спектральной линии. В разреженном газе спектральные линии более узкие, чем в плотном при той же температуре.

В веществе могут быть несколько химических элементов. Для правильного определения химического состава необходимо учитывать, что некоторые атомы находятся в ненаблюдаемых или трудно наблюдаемых состояниях.

Наиболее интенсивные линии не всегда принадлежат самому распространенному элементу. В особых условиях интенсивными становятся линии, которые в обычных условиях или слабы, или не наблюдаются.

Для определения химического состава по спектру надо знать физические условия, температуру.

2.3.4. Цвет космического объекта, температура

Основными космическими объектами наблюдений являются звезды. Они имеют непрерывный спектр, на который накладываются спектральные линии. В основном, это темные линии поглощения, но бывают и яркие линии излучения. Спектры звезд различаются количеством и интенсивностью наблюдаемых линий и распределением энергии в непрерывном спектре. Наибольшей энергией обладает гамма-излучение, затем рентгеновское излучение, далее идет ультрафиолетовое излучение и т.д. – чем больше длина волны, тем меньше энергия излучаемых квантов.

Спектры зависят от физических свойств звезд. В спектрах звезд яркость одних линий химических элементов постепенно ослабевает, других – усиливается. Сходные спектры объединяются в классы. Спектральный класс определяется отношением интенсивностей определенных спектральных линий. Этот принцип, разработанный в Гарварде, лежит в основе спектральной классификации звезд.

Классификацию можно назвать цветовой или температурной. Спектральные классы обозначаются буквами и соответствуют определенному цвету и температуре (в Кельвинах) излучения внешних слоев звезды (рис. 29).

Температура	28-40 тыс.	10-28 тыс.	7-10 тыс.	6-7 тыс.	5-6 тыс.	3.5-5 тыс.	2.5-3.5 тыс.
Цвет	Фиолетовый	Голубой	Белый	Желтоватый	Желтый	Красноватый	Красный
Класс	O	B	A	F	G	K	M
	Голубые		Белые		Оранжевые		

Рис. 29

Энергия излучения зависит от спектрального класса. Спектральная классификация показывает и степень ионизации вещества в звездах (ионизация зависит от температуры).

2.3.5. Зависимость спектр-светимость

В начале XX века американский ученый Ресселл и датский астроном Герцшпрунг расположили на диаграмме звезды в зависимости от абсолютного блеска и спектрального класса (рис. 30). Группы звезд получили условные названия и позволили создать картину образования и эволюции звезд и многих других небесных объектов.

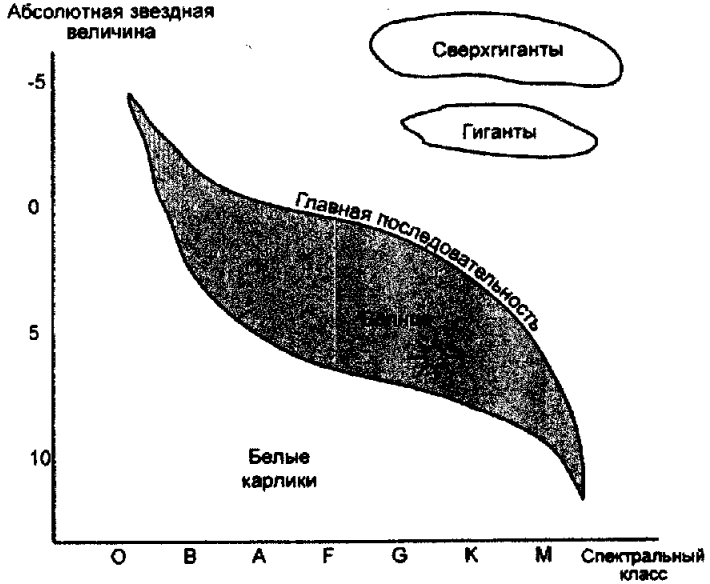


Рис. 30
Диаграмма Герцшпрунга-Рессела

Получилась четкая стройная система. Положение звезды на диаграмме определяется ее физической природой и стадией эволюции. Группы звезд на диаграмме имеют общие физические свойства. Диаграмма устанавливает зависимость между физическими характеристиками звезд, помогает при изучении химического состава.

Гипотезы о происхождении и эволюции звезд основаны на законах физики и математических и физических моделях.

2.3.6. Образование звезд

Гипотезы образования звезд предполагают, что звезды являются газовыми шарами, поверхности которых близки к сферическим, а распределение вещества и его плотности внутри звезды достаточно равномерно. Гипотез образования звезд, причем достаточно убедительных, очень много. Есть и общепринятые.

В космическом пространстве существует смесь ионизированного газа (плазмы) и пыли. Эта смесь связана с магнитным полем и произвольно движется в пространстве (рис. 31).

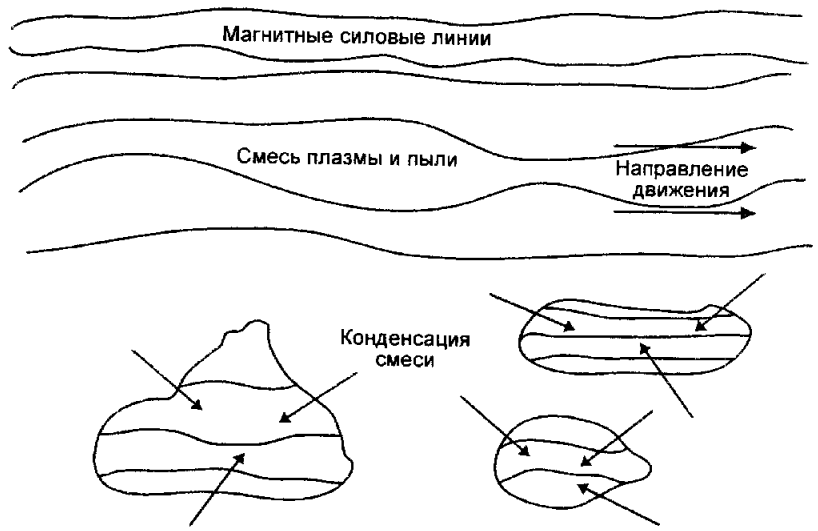


Рис. 31

В какой-то момент, вследствие гравитационной неустойчивости, смесь начинает сжиматься и образовывать облако массой в тысячи масс Солнца. Большое облако разбивается на сотни и тысячи малых облаков

и сжатие продолжается (рис. 31). Энергия, вызванная гравитационным сжатием, сначала излучается в космическое пространство через силовые линии магнитного поля, а при дальнейшем сжатии разогревается вещество в недрах облака. При повышении температуры в ядре до 10-15 миллионов градусов начинаются термоядерные реакции синтеза. Облако становится звездой, сохраняющей термодинамическое равновесие (давление газа внутри уравновешивает гравитационное сжатие) на протяжении десятков, сотен миллионов и даже миллиардов лет, непрерывно излучая энергию (рис. 32).

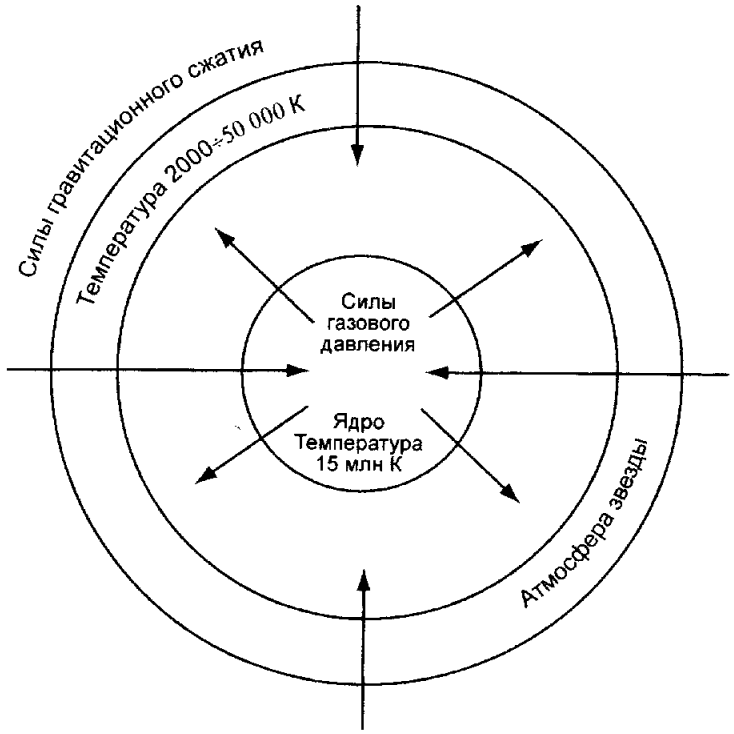


Рис. 32

Звезда занимает свое место на главной последовательности диаграммы (рис. 30) в зависимости от своих характеристик (масса, блеск, спектральный класс).

2.3.7. Эволюция звезд

Излучение звезд подпитывается энергией термоядерных реакций, происходящих внутри звезды. Основные элементы, из которых состоит Вселенная – водород(70%) и гелий (30%). В результате термоядерных реакций водород внутри звезды превращается в гелий. Когда 30-50% водорода выгорит, внутри звезды образуется гелиевое ядро, температура которого уменьшится и опять начнется гравитационное сжатие. При сжатии температура снова начнет повышаться. Если она дойдет до 40 миллионов градусов, могут начаться термоядерные реакции и гелий начнет превращаться в углерод.

Теоретические расчеты и моделирование предполагают, что конечная стадия эволюции звезды зависит от ее массы. За единицу берется масса Солнца $M = 2 \cdot 10^{33}$ г.

Масса звезды $M = 1.4\ M_{\odot}$. Половина массы звезды образует гелиевое ядро, половина – раздувающуюся красную оболочку. Когда оболочка отойдет далеко от ядра, гравитационные силы перестанут ее удерживать и она улетучится в космос – наблюдатель увидит вспышку инфракрасного излучения. Останется гелиевое ядро размером, близким к размерам Земли, массой, близкой к массе Солнца, плотностью $10^6 \div 10^7$ г/см^3, сильным магнитным полем, температурой 5 миллионов градусов, низкой светимостью. Эта звезда называется белым карликом (рис. 33). Постепенно она гаснет и становится черным карликом. Белых карликов в нашей Галактике около 10%.

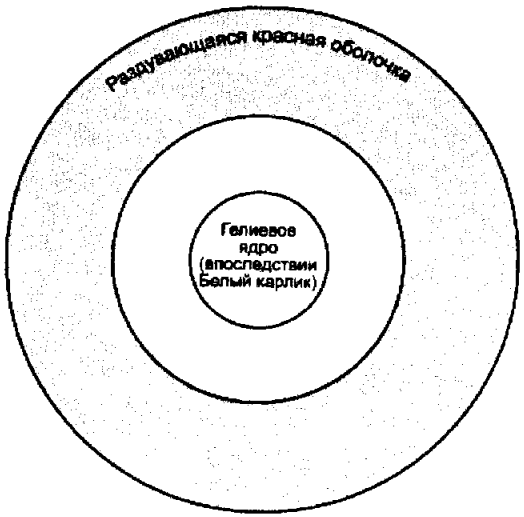


Рис. 33

Вторым вариантом конечной стадии эволюции звезды может быть нейтронная звезда. Если начальная масса звезды около 1.2-1.4 $M_{\odot}$, то в момент нарушения гидростатического равновесия происходит катастрофическое обрушение (коллапс) всей массы звезды к центру за время от тысячных долей секунды до пяти секунд. Плотность увеличивается до 10^{14} г/см^3, магнитное поле становится равным 10^{12} Гс, диаметр звезды – 20 км, момент количества движения остается и звезда начинает вращаться с периодом 0.001-5 секунд. Многие нейтронные звезды излучают периодические сигналы – эти звезды называются пульсарами. Предполагается, что строение звезды похоже на земное : она имеет атмосферу (высота до 1 метра), твердую кору, горы на поверхности звезды (высота до 20 сантиметров), жидкое ядро. Звезда на 95% состоит из нейтронов (рис. 34).

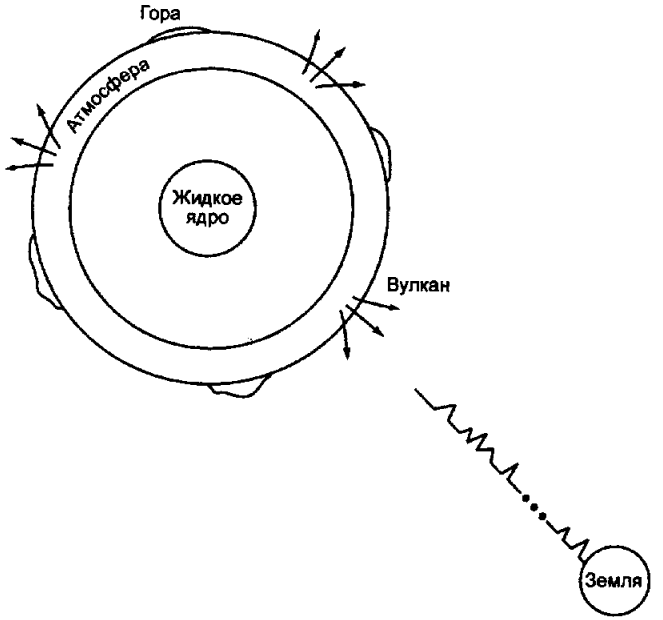


Рис. 34

Если начальная масса звезды от 3 $M_{\odot}$ и выше, то при коллапсе может образоваться черная дыра. Возможность существования подобных объектов предсказал Эйнштейн в общей теории относительности, хотя подобные идеи высказывал и Лаплас за 120 лет до Эйнштейна.

Черная дыра – удивительный объект, который создает вокруг себя мощное гравитационное поле, все поглощает и ничего не излучает. Считается, что это шар, радиус (он называется гравитационным) которого зависит от первоначальной массы звезды. Например, если Солнце превратится

в черную дыру, то ее гравитационный радиус будет равен 3 километрам, для Земли – 0.9 сантиметра. Черные дыры похожи – не имеет значения из какого первоначального вещества состояла звезда. Что происходит внутри черной дыры, сказать никто не может. Предполагается, что частицы, попавшие внутрь, будут непрерывно двигаться к центру. Согласно общей теории относительности, для наблюдателя, находящегося далеко от черной дыры, движение частиц вблизи черной дыры замедляется и почти останавливается. Это движение становится бесконечно долгим. Затем частица внезапно пропадает. Если бы наблюдатель двигался вместе с частицей, то он бы никаких перемен не обнаружил. Возможно, в черных дырах (если они существуют) находится бóльшая часть материи Вселенной.

2.3.8. Солнце

Солнце, в сравнении с другими звездами, рядовая звезда, но для нас она главная – хотя бы потому, что дает жизнь на Земле. Солнце и процессы, связанные с Солнцем, изучались всегда, но оно до сих пор остается едва ли не самым загадочным небесным телом.

Солнце представляет из себя газовый шар с концентрическими слоями разной плотности и температуры (рис. 35).

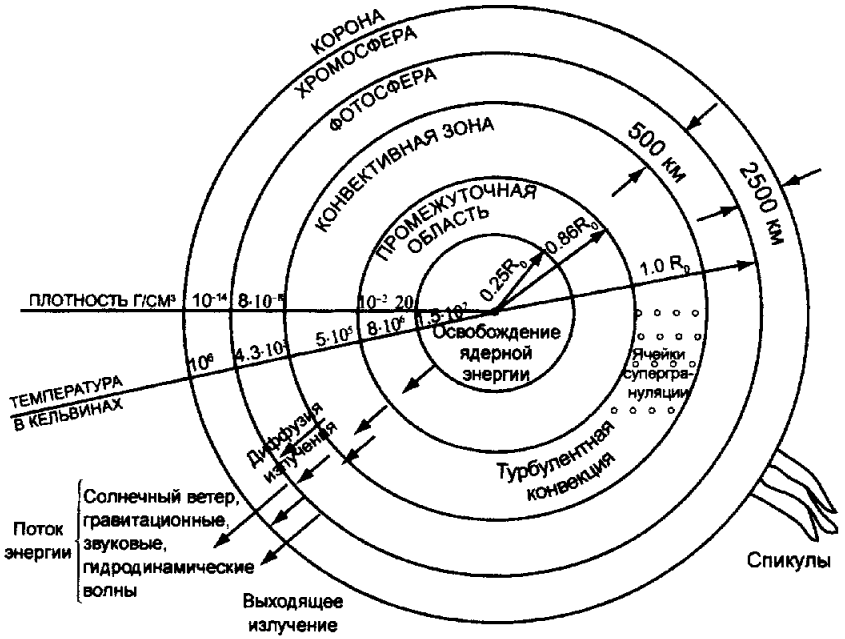


Рис. 35

Его радиус $6.96 \cdot 10^{10}$ см, масса $2 \cdot 10^{38}$ г, плотность 1.41 г/см^3, температура поверхности излучения 5785 К. Период вращения вокруг собственной оси – 25-30 суток.

Фотосфера – это область Солнца, откуда исходит излучение. В фотосфере существуют мелкие неоднородности яркости – гранулы. Размеры гранул около 1000 км. Время жизни гранул - 7-10 минут. Более крупные образования – солнечные пятна (около 43 000 км в длину, самое крупное –185 000 км; для сравнения – радиус Земли около 6 800 км). Количество пятен на Солнце меняется. Иногда не видно ни одного. От минимума до максимума – 11 лет. Подъем солнечной активности – 4 года, затухание – 7 лет.

Вещество на Солнце значительно ионизировано. Ионизированный газ (плазма) обладает высокой теплопроводностью и электропроводностью. Плазма тесно связана с магнитными полями. Движение плазмы происходит вдоль магнитных силовых линий, но это движение заставляет двигаться и само магнитное поле.

Грануляция хромосферы более грубая, чем у фотосферы, представляет собой сплошную сетку. Гранулы имеют волокнистый вид. Над хромосферой на несколько десятков тысяч километров выступают выбросы, которые называются протуберанцами. Протуберанцы разделяются на спокойные и активные. Существуют они 5-7 дней. Имеют волокнистый вид. Длина до 200 тыс. км.

Корона, граничащая с межпланетной средой, является внешней атмосферой Солнца. Блеск короны равен 1/1 000 000 доли блеска Солнца. Период вращения короны равен периоду вращения Солнца. Вследствие большого простирания короны, предполагается, что у нее очень высокая температура. Атомы в короне многократно ионизированы. Обнаружено радиоизлучение короны, в основном в рентгеновской области.

Важную роль во всех солнечных процессах играют магнитные поля. Наибольшая напряженность магнитных полей в солнечных пятнах. Пятна показывают нестабильность процессов на Солнце.

Пятно или группа пятен могут образоваться в фотосфере за 2-20 дней и существовать до нескольких месяцев (даже до 1.5 лет).

Возникшая группа пятен растянута по долготе. Часто видны два пятна, движущихся вместе.

В центре пятна магнитные силовые линии идут по оси пятна вверх или вниз. Магнитное поле не исчезает после исчезновения пятна. Оно усиливается, если там появляются новые пятна. Пятно выносит наружу магнитное поле. В этих местах возникают активные области. Маг-

нитная полярность пятен с окончанием цикла солнечной активности меняется (рис.36).

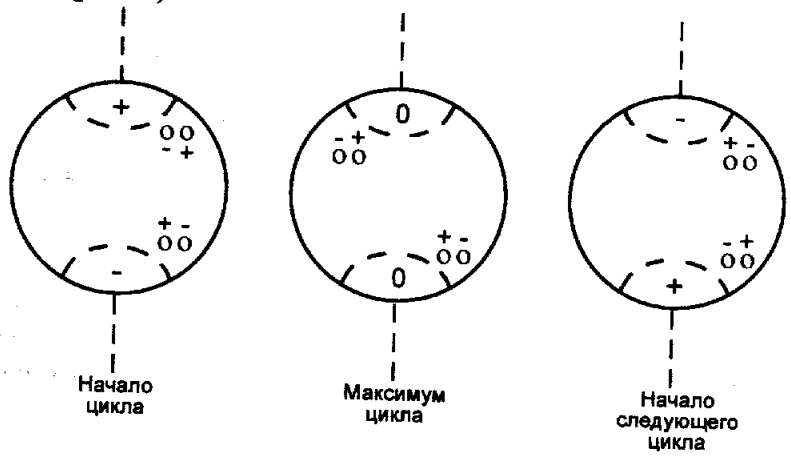


Рис. 36

Затухание магнитного поля происходит в течение сотен лет. Поэтому активные области существуют долго и магнитные поля то уходят вглубь, то всплывают на поверхность фотосферы.

Магнитные поля связаны с циркуляцией плазмы глубиной в десятки тысяч километров. Движения возникают из-за неоднородности вращения Солнца. Циркуляция плазмы порождает магнитные вихри. Когда вихри выходят на поверхность, появляются отдельные пятна и группы пятен.

В хромосферу и корону магнитные силовые линии выносятся массами вещества.

Во время солнечных вспышек в короне возникает рентгеновское излучение. Солнечная вспышка – усиление яркости отдельных полей в хромосфере (факелы), увеличение яркости отдельных частей фотосферы. Вспышка может длиться до семи часов. Верхняя часть вспышки входит в корону, нижняя часть может быть оторвана от фотосферы. Вспышка сопровождается выбросом темного волокна со скоростью до 500 км/с. Возникают яркие хромосферные точки (бомбы). Вспышки сопровождаются усилением излучения во всех частотах. Вспышка начинается в хромосфере или короне. В точке происходит выделение тепла и ускорение частиц. Поток частиц распространяется вдоль магнитного поля.

На волнах с длиной волны меньше 20 см возникают быстрые всплески из центров, связанных со вспышками – это тепловое излучение. Нетепловые вспышки возникают в метровых и, иногда, в дециметровых диапазонах. Они разнообразны по форме, частоте и интенсивности. Движение центра нетепловой вспышки происходит со скоростью 150 000 км/с. Эти вспышки совпадают по фазе с солнечными вспышками и длятся несколько секунд.

На Солнце наблюдаются радиобури на длинах волн 33 м – 8.5 мм с высокой интенсивностью в метровом диапазоне и длительностью от нескольких минут до десятков минут. Всплески перемещаются в короне со скоростью 1000 км/с и исходят из вспышек или выбросов протуберанцев.

Радиоизлучение Солнца в более широком диапазоне продолжается от десяти минут до нескольких часов и вызывает возникновение на Земле полярных сияний, прекращения радиосвязи на коротких волнах в полярной области.

Шумовые бури происходят на метровых волнах в виде коротких радиовсплесков непрерывного излучения в течение 0.2-0.5 секунд.

Плазменные колебания при переходе из хромосферы с высокой концентрацией электронов в верхние слои вызывают дрейф по частоте – излучение начинается с высоких частот и кончается низкими.

Поток излучаемых частиц во время вспышек на Солнце возрастает. Частицы движутся с очень высокими скоростями. На Земле мы наблюдаем вторичное излучение. Земля получает одну двухмиллиардную долю излучения Солнца.

2.3.9. Солнечные и земные явления

Все нестационарные процессы на Солнце вызывают возмущения в земных процессах. Периодичность числа солнечных пятен в 11 лет совпадает с периодичностью возмущений магнитного поля Земли. Возникающие магнитные бури (быстрые и неправильные колебания большой амплитуды) длятся до нескольких суток. Более слабые колебания – магнитные возмущения. Существует годичная периодичность возмущений. Особенно часты возмущения в марте и сентябре. 27 –дневная периодичность связана с вращением Солнца.

Полярные сияния обнаруживают 11-летнюю и годичную периодичность. Сильные магнитные бури почти всегда сопровождаются интенсивными полярными сияниями. Лучи полярного сияния располагаются вдоль магнитных силовых линий Земли. Пучки иногда исходят из одной области неба, называемой короной. Высота сияния от 100 до 1000 км. Максимум интенсивности близок к нижней границе. Свет сияния состоит из зеленого и красного.

Атмосфера Земли имеет сложную структуру (рис. 37).

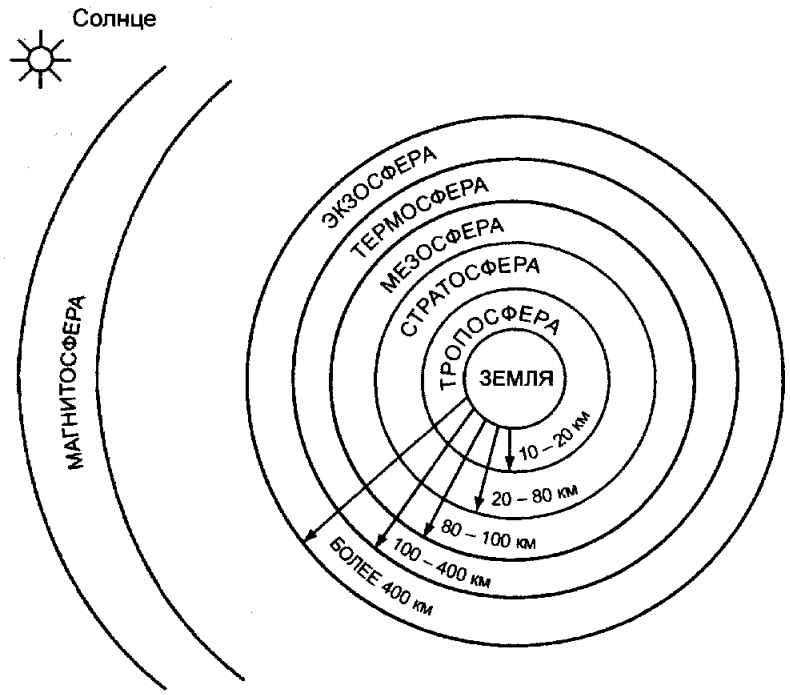


Рис. 37

До высоты 100 километров атмосфера хорошо перемешивается. Для высот выше 200 км днем плотность атмосферы увеличивается, ночью – уменьшается. Спад солнечной активности уменьшает плотность. Вокруг Земли имеется водородная корона.

Три слоя частично ионизированной атмосферы Земли на высоте от 60 до 300 км называется ионосферой. Она отражает радиоволны. Нижний слой ночью исчезает.

На высотах 50-20 км ультрафиолетовое излучение Солнца с длинами волн 2000-3000 А поглощается озоном. Озон простирается до высоты 10 км.

Каждый слой атмосферы ионизируется своей областью спектра солнечного излучения. Верхний слой порождается рентгеновским излучением и наиболее сильно зависит от солнечных вспышек. Среднее значение критической частоты, пропускаемой каждым ионосферным слоем, возрастает при усилении солнечной активности, что свидетельствует о возрастании

ионизации. Спад ионизации в ночное время делает ионосферу более прозрачной для коротких волн.

Во время сильных и средних вспышек на Солнце на Земле наблюдается прекращение радиосвязи на частотах 5-20 МГц через дневную половину земного шара, прекращается отражение от ионосферы и усиливается поглощение радиоизлучения космических источников на длине волны 10-15 метров, в атмосфере усиливаются помехи, понижается высота верхнего ионосферного слоя, усиливаются потоки космических лучей, через 17-21 час после вспышки происходят магнитные бури, возникают полярные сияния.

Вокруг Земли постоянно существуют кольцевидные области, заполненные частицами высоких энергий – радиационные пояса (рис. 38). Изучение этих поясов позволило установить геометрические и физические характеристики магнитосферы Земли.

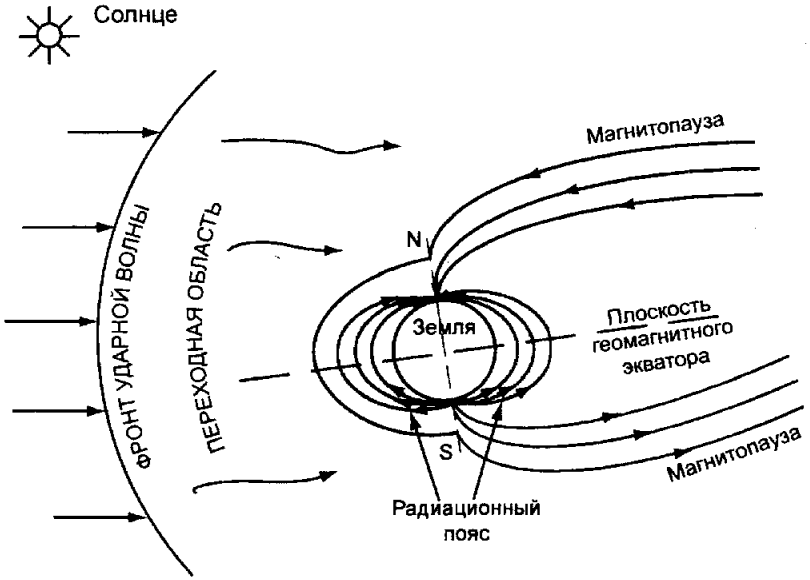


Рис. 38

Земля является магнитным диполем. Заряженные частицы внутри оказываются в геомагнитной ловушке. Зона частиц высокой энергии простирается от нескольких сотен километров над поверхностью до 6-10 радиусов Земли. Частицы во внутренней зоне имеют бóльшую энергию, чем во внешней.

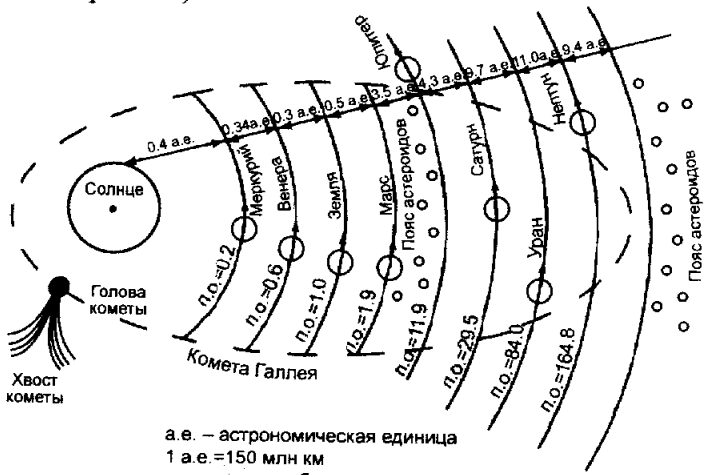
Магнитное поле из района вспышки Солнца распространяется дале-

ко. Магнитные силовые линии потока солнечной плазмы сближаются с силовыми линиями земного магнитного поля. По этому мосту частицы не очень высокой энергии переходят от Солнца к Земле.

Солнечный ветер – ионы различных элементов, вытекающие из Солнца со скоростью 250-500 км/с (корпускулы). Солнечный ветер, несущий магнитное поле, создает межпланетное магнитное поле напряженностью до $5 \cdot 10^{-5}$ Э. Источником солнечного ветра служит тепловая неустойчивость солнечной короны. Корпускулы выходят в межпланетное пространство через корональные дыры – темные области короны, резко контрастирующие с обширными светлыми. В дырах плотность вещества в три раза меньше, чем у нормальной спокойной короны. Температура также ниже. Потоки корпускул проходят сквозь незамкнутые магнитные поля. Скорость движения корпускул выше скорости частиц среды (скорость звука). При встрече с Землей в этом сверхзвуковом потоке образуется ударная волна. Солнечный ветер несет магнитное поле, поэтому для него препятствием служит магнитное поле Земли. Между границей магнитосферы и отошедшей ударной волной образуется магнитопауза, отделяющая магнитное поле Земли от межпланетного поля. Граница магнитосферы – 10 земных радиусов, при корпускулярных возмущениях – 6.

2.3.10. Солнечная система

Солнечная система имела 9 больших планет (рис. 39). Сейчас – 8. Принято решение Плутон считать не большой планетой, а карликовой (новая категория тел).



а.е. – астрономическая единица
1 а.е.=150 млн км
п.о. – период обращения вокруг Солнца (в земных годах)

Рис. 39

Наименьшая планета – МЕРКУРИЙ. Его период обращения вокруг Солнца – 88 дней. Колебание температуры на поверхности от 100 до 800 К. Поверхность Меркурия усеяна кратерами, заметны следы вулканической деятельности. Атмосфера на Меркурии отсутствует, поэтому происходит сильное облучение поверхности мощными корпускулярными потоками Солнца. Предполагается, что Меркурий имеет расплавленное металлическое ядро. Средняя плотность вещества 5.4 г/см^3.

ВЕНЕРА. Температура 300-600 К. Атмосфера содержит много углекислого газа (97%) и в ней проявляется парниковый эффект, который вместе с парами воды задерживает собственное планетное излучение. Давление в атмосфере доходит до десятков атмосфер. Вращение Венеры вокруг оси направлено в сторону, противоположную ее обращению вокруг Солнца. Период обращения Венеры вокруг Солнца – 225 земных суток. Период обращения вокруг оси – 243 земных суток. Средняя плотность вещества 5.2 г/см^3. Рельеф сглажен. Высота горных образований до 12 км. Глубина кратеров до 2.5 км. Тепло, выделяемое из недр, поднимает температуру в отдельных точках до 700 С. Циркуляция атмосферы у поверхности невелика. Воды на Венере в 1000 раз меньше, чем на Земле. Из-за высокой температуры Венера потеряла почти весь водород. Азота на Венере также мало. Венера вращается медленно, но, несмотря на это, температура на дневной и ночной стороне Венеры отличается мало. Магнитное поле на Венере почти отсутствует.

МАРС. Имеет прозрачную атмосферу и быстрое вращение. На поверхности Марса находятся кратеры диаметром 0.5-500 км с перепадом высот 13 км. На дне кратера наблюдаются извилистые трещины, напоминающие русла рек. Марс имеет полярные шапки – белые образования, которые в зависимости от времен года увеличиваются в размерах зимой (для данного полушария) и тают летом. Смена времен года объясняется наклоном оси вращения Марса к плоскости орбиты Марса на угол 24 (почти как у Земли). Рельефные образования на поверхности Марса, которые условно называют морями, заливами и озерами, изменяются в зависимости от времени года. Поверхность Марса – оранжево-красная пустыня, песчаная, усеянная камнями. В грунте обнаружен углекислый газ и кислород.

Давление атмосферы у поверхности 4-6 миллибар. Атмосфера редко бывает чистой. Облака имеют белый, желтый, синий цвет. Для разных облаков наблюдается разная поляризация. Размер облаков доходит до 2000 км. Белые облака состоят из ледяных кристаллов. На Марсе бывают

пылевые бури. Атмосфера состоит на 95 % из углекислого газа. Марс имеет два спутника: Фобос и Деймос.

ЮПИТЕР. Самая большая планета солнечной системы с массой, равной 0.001 массы Солнца и периодом вращения вокруг оси всего в 10 часов. Плотность вещества 1.3 г/см^3.

В атмосфере Юпитера наблюдаются облака в виде полос, структура и цвет которых постоянно меняются. Околополярные области устойчивы, а экваториальные полосы исчезают и появляются через каждые четыре года.

Температура облаков Юпитера 140-320 К. Поток тепла из недр превышает солнечный в два раза. Он приводит к возникновению в атмосфере бурных вертикальных течений вверх и вниз. В 1878 году на Юпитере обнаружили красное пятно длиной 40 000 км и шириной 13 000 км и температурой 120-140 К. Погода на Юпитере мало зависит от Солнца. Юпитер состоит из метана, аммиака, молекулярного водорода, паров воды, гелия, углерода.

У Юпитера наблюдается сильное магнитное поле и радиоизлучение. Радиоизлучение имеет нетепловой характер. Область излучения дециметровых волн в три раза больше диска Юпитера – излучение исходит из околополярного пространства от электронов, захваченных магнитосферой Юпитера в радиационные пояса. Размеры магнитосферы от 20 до 100 радиусов Юпитера.

Юпитер имеет 63 спутника. Один из них – Ио – имеет собственное магнитное поле, которое влияет на характер радиовсплесков Юпитера. Периоды обращения спутников вокруг Юпитера от нескольких часов до 750 суток. Четыре спутника имеют движение противоположное вращению планеты. Радиусы спутников от нескольких километров до 2610 км. На поверхности четырех спутников, которые в 1610 году открыл Галилей, обнаружены лед и скалы. У Ио есть атмосфера, ионосфера, газовое облако из натрия, калия, серы.

САТУРН. Сатурн также является большой планетой и очень похож на Юпитер. Плотность вещества Сатурна 0.7 г/см^3, температура 80-120 К, химический состав – водород, метан аммиак, гелий, 2% тяжелых элементов. Магнитное поле сильнее земного.

С Земли виден Сатурн, окруженный тремя кольцами, лежащими в одной плоскости и имеющими толщину 1 км. Кольца состоят из частиц от нескольких микрон до нескольких метров. Внешнее кольцо имеет радиус 122 000 км и отделено от среднего самого яркого темным промежутком. У Сатурна 60 спутников.

УРАН, НЕПТУН. Эти планеты, вследствие большой удаленности от Земли, изучены мало. Нептун и Уран сходны по массе, размерам и физическим условиям. Средняя температура 36 К. У Урана имеются кольца. Магнитные поля планет в несколько десятков раз сильнее, чем у Земли. В спектре планет наблюдается метан, водород, гелий. У Урана 27 спутников, у Нептуна – 13.

АСТЕРОИДЫ. Астероидов насчитывается сотни тысяч. Они образуют кольцо вблизи эклиптики и находятся между Марсом и Юпитером. Второе кольцо (пояс Койпера) – за планетой Нептун (рис. 38). Возможно, астероиды – остатки разорвавшейся планеты.

Астероиды состоят из камней и пыли. Атмосферы у астероидов нет. Температура поверхности 200-250 К.

КОМЕТЫ. Кометы можно наблюдать, когда они приближаются к Солнцу и вокруг ядра кометы образуется большая голова, из которой выходят один или несколько хвостов (рис. 39). При движении кометы подвергаются гравитационным воздействиям со стороны планет. Эти возмущения изменяют орбиты комет. Голова кометы может достигать размеров Солнца, хвост – 150 млн км.

Комета состоит из газа, пыли и льда. Распадаясь, комета порождает метеорный поток, движущийся по ее орбите. Блеск кометы возрастает при ее приближении к Солнцу. В комете светятся газы, а пыль отражает солнечный свет. Пыль в голове кометы появляется после оттаивания льда кометного ядра. Она выбрасывается со скоростями несколько десятков метров в секунду и подхватывается давлением солнечного света.

При сближении с Солнцем комета теряет часть своей массы. Многие кометы прекращают свое существование, дробятся. При пересечении орбиты Земли кометой наблюдаются метеорные дожди.

Кометы – остатки газопылевого облака, из которого образовались планеты.

МЕТЕОРЫ. Метеорами называют тела, попавшие в атмосферу Земли. Если они достигают поверхности Земли, их называют метеоритами. Огненный шар со светящимся следом – болид.

Метеоры двигаются в пространстве параллельно, образуя метеорный поток. Для наблюдателя этот поток выходит из одной точки. Потоки движутся по замкнутым орбитам. Метеорные потоки каждый год появляются из одних и тех же точек в одни и те же даты – Земля встречается с потоком в одном и том же месте своей орбиты. Метеорная частица входит в

атмосферу со скоростью в несколько десятков км/с. Образуется ударная волна, за фронтом которой температура повышается до десятков тысяч кельвинов и воздух ионизируется. Метеорное тело разогревается, часть массы уносится. Ионизированные газы располагаются вдоль траектории в виде светящегося следа. На высоте 40-50 км тело дробится, на высоте 20 км скорость тела замедляется. Метеориты выпадают на землю в виде метеоритного дождя. В сутки выпадает более 15 тонн метеоритов.

Метеориты делятся на железные, железо-каменные, каменные. Время облучения метеоритов космическими лучами десятки и сотни миллионов лет. Железные метеориты старше каменных. Более 30 метеоритов имеют массу более тонны.

МЕТЕОРНОЕ И ПЫЛЕВОЕ ВЕЩЕСТВО приходит из ядра кометы с умеренными скоростями. Химический состав метеорных тел близок к кометному веществу. Комета превращается в метеорный поток. На всю поверхность Земли осаждается 150 тонн метеорной пыли за сутки.

Образование льда на осаждающихся пылинках может вызвать появление наблюдаемых с Земли серебристых облаков.

Вокруг Земли находится пылевое облако космического происхождения. Пылевые частицы проявляются в зодиакальном свете, который наблюдается вечером на западе после захода Солнца и утром на востоке до восхода Солнца. Спектр зодиакального света подобен солнечному. Частицы сильно сгущаются к эклиптике. Яркость свечения переменна во времени. В образовании зодиакального света участвуют электроны, которые рассеивают свет независимо от длины волны. Облако частиц, вызывающих зодиакальный свет, должно было бы исчезнуть через сотни тысяч лет. Но электроны пополняются Солнцем, твердые частицы – кометами.

В антисолнечной точке наблюдается противосияние, слабое свечение овальной формы с угловыми размерами 10°-13° вдоль эклиптики и 6°-8° поперек эклиптики. Свечение изменчиво. Спектр противосияния воспроизводит солнечный. Природа противосияния пылевая. Она отлична от пыли зодиакального света. Местоположение противосияния размыто.

2.4. Происхождение и эволюция Вселенной

Предполагается, что Вселенная возникла после взрыва, произошедшего 15-20 миллиардов лет назад. В первые мгновения расширения Вселенной происходили ядерные реакции между элементарными частицами. В результате ядерных реакций образовались химические элементы. До этого (10^{-43}с) образовались сами элементарные частицы. Плотность материи была 10 г/см^3.

Теория горячей Вселенной предсказывает существование в настоящее время электромагнитного низкотемпературного излучения – радиоволны в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Это микроволновое излучение, которое обнаружили в 1965 году, было названо реликтовым. Оно имеет температуру около 3 Кельвинов. Сегодня плотность энергии в реликтовом излучении в 30 раз больше, чем остального наблюдаемого излучения звезд, галактик, радиогалактик. Число фотонов реликтового излучения 500 штук в см^3. Средняя плотность вещества во Вселенной 1 атом в м^3 (10^9 реликтовых фотонов на одну тяжелую частицу).

Реликтовые фотоны в современной Вселенной почти не взаимодействуют с веществом и из-за этого не меняются в числе. В далеком прошлом плотность и температура были большими. Вещество было ионизированной однородной плазмой и не пропускало излучения. Существовало равновесие между излучением и веществом.

На ранних стадиях расширения (время меньше 10 с) основную долю массы физической материи во Вселенной составляет свет. Через секунду, когда температура понизилась до 10 миллиардов К происходит рождение и аннигиляция частиц. По мере расширения температура падала и энергии для рождения тяжелых частиц не хватало – тяжелые частицы вымирали (рис. 40).

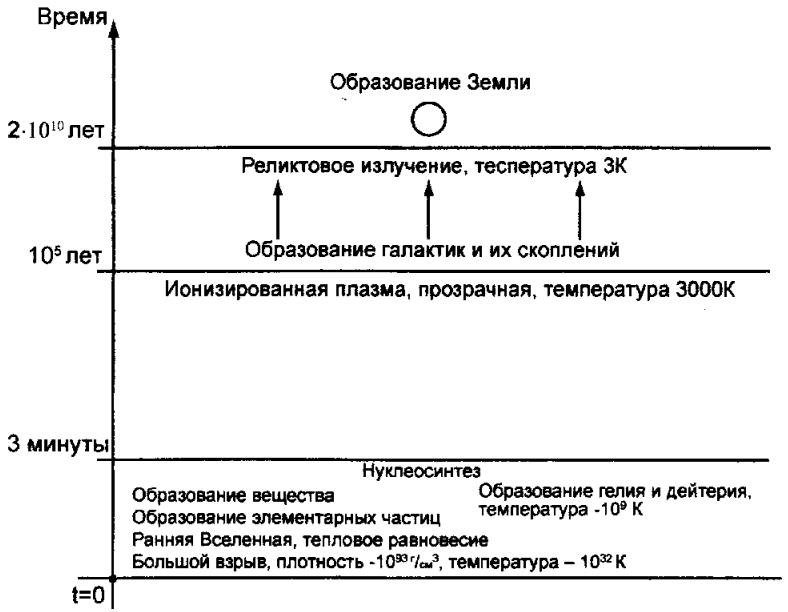


Рис. 40

Когда прошло 0.3 секунды, все вещество Вселенной становится прозрачным для нейтрино, они перестают взаимодействовать с другим веществом. Их число не меняется до наших дней, но их энергия должна упасть. В наше время кроме реликтового электромагнитного излучения должны существовать реликтовые нейтрино и антинейтрино. Их энергия и концентрация должны совпадать с реликтовым электромагнитным излучением. Обнаружить реликтовое низкоэнергетическое нейтрино сейчас практически невозможно.

При температуре более 10 миллиардов Кельвинов вещество полностью ионизировано. Тяжелыми частицами являются протоны и нейтроны. Их взаимодействие с высокоэнергичными электронами, позитронами, нейтрино и антинейтрино заставляет протоны и нейтроны быстро превращаться друг в друга. В ходе расширения температура понижается и реакции после первых секунд почти прекращаются.

Когда температура равна 1 миллиарду Кельвинов, образуются простейшие сложные ядра. Энергии квантов уже не хватает, чтобы разбивать сложное ядро. Все нейтроны захватываются протонами. Образуется дейтерий, затем гелий. Более сложных ядер в таких условиях не образуется. Заканчивается этот процесс через 300 секунд, когда температура падает ниже 1 миллиарда Кельвинов.

Более тяжелые элементы образуются в недрах звезд, где вещество находится долго и реакции успевают произойти. Частично газ, возникший после реакций, выбрасывается в космос. Из этого газа формируются небесные тела следующих поколений.

По истечении 5 минут с начала расширения вещество состоит на 70% из протонов (ядер атомов водорода) и на 30 % из ядер атомов гелия.

Через 10 секунд, когда температура упала до нескольких миллиардов градусов, электроны и позитроны, аннигилируя, стали превращаться в фотоны реликтового излучения.

При дальнейшем охлаждении прекращаются ядерные реакции и 300 000 лет во Вселенной не происходит заметных изменений. Но плазма еще горяча и ионизирована. Она не прозрачна для реликтового излучения, которое по массе превосходит непрозрачную плазму.

При 4000 Кельвинов ионизированная плазма превращается в нейтральный газ, прозрачный для большинства фотонов. С этого момента реликтовое излучение отделилось от вещества. Вещество с расширением становится все более холодным и разреженным. Начинается формирование небесных тел. За эрой фотонной плазмы наступает эра формирования структуры Вселенной. Возникает гравитационная неустойчивость вещества и образуются облака. Сгусток распихивался фотонным реликтовым

излучением, пока плазма была горяча и непрозрачна. При нейтральном газе, когда фотонное излучение прозрачно, проявилась гравитационная неустойчивость. Начинают образовываться звезды и скопления звезд, которые носят название галактик.

2.5. Галактики. Скопления галактик

Галактика – скопление миллиардов звезд и межзвездного вещества. Мы с Земли галактики наблюдаем в виде туманностей. Свое название они получили от нашей звездной системы, которую мы называем «Наша Галактика».

Наша Галактика насчитывает более 100 миллиардов звезд. Объем напоминает линзу с поперечником 100 тысяч световых лет (1 световой год = $9.46 \cdot 10^{12}$ км) и толщиной 12 000 световых лет (рис. 41).

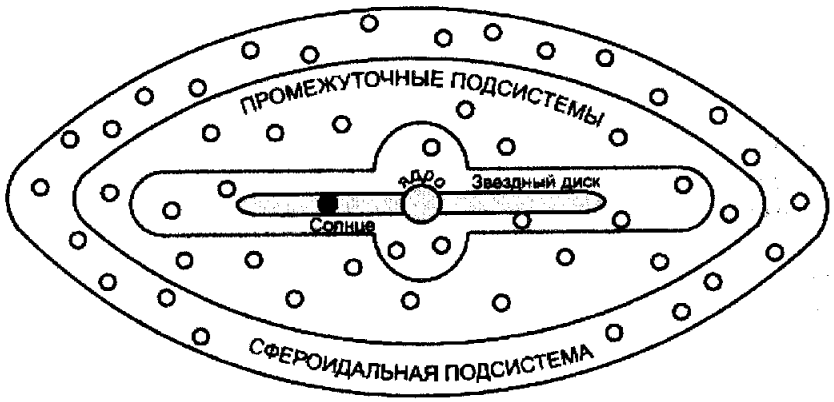


Рис. 41

5 % от общей массы звезд составляет межгалактический газ и пыль. В сферической части находятся более слабые и старые звезды. Молодые звезды собраны в спиральных закручивающихся рукавах галактики. Звезды и газ диска движутся по почти круговым орбитам вокруг центра масс Галактики. Солнце движется со скоростью 250 км/с и совершает полный оборот за 200 миллионов лет.

Другие галактики похожи на нашу: они имеют размеры в десятки тысяч световых лет и несколько миллиардов звезд. От нас они находятся на расстоянии в миллионы световых лет. По на-

блюдаемой форме этих туманностей их делят на спиральные, эллиптические,неправильные (рис. 42).

Рис. 42

Спиральные и неправильные – молодые галактики. Эллиптические галактики – старые, они имеют только сферическую составляющую. Неправильные галактики наблюдаются в виде пятен. Существуют также карликовые галактики, насчитывающие несколько миллионов звезд.

Звездная плотность в галактиках убывает от центра. Галактики вращаются. Направление вращения - в сторону закручивания спиралей. Средняя масса галактик $2 \cdot 10^{44}$ г. Из центральной части – ядра – происходит истечение газа со скоростью 10-8500 км/с. Галактики имеют рентгеновское и радиоизлучение.

Галактики образуют правильные и неправильные скопления . Правильные имеют сферическую форму и насчитывают десятки тысяч галактик. Чаще всего это эллиптические или линзообразные. Галактики движутся относительно друг друга со скоростью 1000 км/с.

К неправильным относятся все остальные типы скоплений галактик. Число галактик в неправильных скоплениях меньше, чем в правильных. Есть сгущения галактик внутри скопления.

Распределения крупных скоплений галактик носят ячеистый характер. Галактики и их скопления расположены в стенках ячеек, внутри находится пустота. Размеры ячеек – 300 миллионов световых лет, толщина стенок – 10 миллионов световых лет. Большие скопления и сверхскопления галактик образуются в узлах ячеистой структуры. Сверхскопления часто имеют сильно вытянутую форму.

Крупномасштабные скопления не собираются в более крупные, а равномерно заполняют пространство Вселенной. Вселенная в самых больших масштабах (более 300 миллионов световых лет) однородна. Однородность прослежена на расстоянии до 10 миллиардов световых лет.

Наша Вселенная расширяется – такое открытие было сделано в 20-х годах XX века на основании наблюдавшихся удалениях почти всех галактик от нашей Галактики. В 1929 году Хаббл обнаружил, что чем дальше от нас находится галактика, тем больше скорость ее удаления: скорость прямо пропорциональна расстоянию. Коэффициэнт пропорциональности (постоянная Хаббла) позволяет оценивать возраст Вселенной.

Все галактики разбегаются друг от друга и бесконечная Вселенная может бесконечно расширяться. Галактики сейчас движутся по инерции, но их разбегание тормозится тяготением. Это расширение никогда не остановится, если плотность материи 10^{-31} г/см^3, или через некоторое неопределенное время Вселенная начнет сжиматься, если средняя плотность материи 10^{-29} г/см^3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы коснулись только некоторых вопросов астрономии. Астрономия необъятна, как и Вселенная, которую астрономия изучает. Астрономия развивается, появляются новые разделы астрономии. Астрономия неотделима от нашей повседневной жизни…